



УДК 520.626.05:523.9-739

## МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АППАРАТУРЫ ДЛЯ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА ГЕОЭФФЕКТИВНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА

А.А. Нусинов<sup>1</sup>, А. В. Алексеева<sup>1</sup>, П. С. Заверткин<sup>2</sup>, Д. В. Ивлюшкин<sup>2</sup>, Ю. М. Качановский<sup>1</sup>,  
С. В. Кузин<sup>3</sup>, В. Т. Минлигареев<sup>1</sup>, А. Д. Николенко<sup>2</sup>, Е. А. Панышин<sup>1</sup>, А. А. Перцов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова, Россия, г. Москва

<sup>2</sup>Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН, Новосибирск

<sup>3</sup>Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва

Представлены результаты калибровки новых полупроводниковых детекторов для мониторинга потока солнечного ультрафиолетового излучения в линии Лайман-альфа ( $L_{\alpha}$ , 121.6 нм) на геостационарных космических аппаратах "Электро" Росгидромета. Калибровка проводилась на источнике синхротронного излучения релятивистских электронов на канале накопителя электронов ВЭПП4. Пучок излучения в отдельных узких участках спектра формировался с помощью метрологического комплекса "Космос" в Сибирском международном центре синхротронного излучения релятивистских электронов Института ядерной физики СО РАН. Результаты анализа спектральных кривых чувствительности показали, что чувствительности датчиков могут сильно (на ~30%) отличаться между собой. С использованием модельных спектров ультрафиолетового излучения Солнца выполнен расчет вклада  $P$  в сигнал детектора от линии  $L_{\alpha}$  и от участка спектра свыше ~122 нм. В результате анализа модельных расчетов для различных уровней активности показано, что величина  $P$  может сильно различаться для различных датчиков:  $P$  составляет 30%–60% при низком уровне солнечной активности и 50%–70% при высоком. Этот результат указывает на необходимость калибровки всех каналов каждого полетного прибора и учета при мониторинге космической погоды зависимости от уровня солнечной активности величины  $P$  вклада в сигнал ВУСС-Э от линии  $L_{\alpha}$ .

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ СОЛНЦА, СОЛНЕЧНЫЕ СПЕКТРОФОТОМЕТРЫ, КАЛИБРОВКА

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Формирование свойств верхней атмосферы и ионосферы практически целиком определяется геоэффективным электромагнитным излучением Солнца, вызывающим диссоциацию и ионизацию молекул газов, входящих в состав атмосферы. Одним из методов контроля и прогноза состояния верхней атмосферы и ионосферы является их математическое моделирование. Для реализации этого метода необходимым компонентом является контроль и прогноз спектров солнечного ультрафиолетового излучения с длиной волны короче порога ионизации молекулярного кислорода (242 нм).

Прямые измерения в этих областях спектра Солнца возможны только на космических аппаратах (КА) и проводятся уже длительное время (см., например, [Woods, 2018, Schmidtke 2017]). Они требуют

чрезвычайно сложной и дорогой аппаратуры и обслуживающей её инфраструктуры КА. Для мониторинга спектров геоэффективного электромагнитного излучения Солнца в рамках гелиогеофизической службы предполагается использовать имеющиеся статистические модели коротковолнового (КУФ, с длинами волн  $\lambda$  10-105 нм) и далекого (ДУФ с  $\lambda$  115-242 нм) излучения. Входным параметром для этих моделей является плотность потока солнечного излучения  $I_{La}$  в линии Лайман-альфа ( $L\alpha$ ,  $\lambda = 121.6$  нм). Реализация такого подхода возможна путем мониторинга интенсивности этой линии с помощью узкополосного фотометра, что значительно проще и дешевле спектрометрических измерений. В гелиогеофизической службе предполагается проведение мониторинга  $I_{La}$  на геостационарных КА "Электро" с помощью солнечных спектрофотометров ВУСС-Э. Мониторинг проводился на КА "Электро-Л № 1" и проводится в настоящее время на КА "Электро-Л № 2".

## 2. АППАРАТУРА ДЛЯ МОНИТОРИНГА УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Аппаратура ВУСС-Э представляет собой измерительный преобразователь потоков ультрафиолетового излучения в электрический сигнал – цифровой двоичный код. Первоначально возможность измерений потока излучения в узкой спектральной полосе вблизи линии  $L\alpha$  исследовалась в рамках проекта КОРОНАС [Нусинов и др.]. При этом использовались фотоэлементы с катодом  $CuJ$ . Было обнаружено, что их чувствительность эпизодически изменяется, причем убывание чувствительности сменялось возрастанием с характерным временем в несколько месяцев. Поэтому в дальнейшем на КА "Электро-Л № 1" и "Электро-Л № 2" в качестве элементов, регистрирующих ультрафиолетовое излучение, использовались электронные фотоумножители ФЭУ—154. В перспективе для этой цели решено использовать полупроводниковые кремниевые фотодиоды. Принцип регистрации основан на сборе электронов, образующихся в рабочем теле приёмника под действием попавших в него фотонов.

Калибровка аппаратуры ВУСС-Э проводилась на метрологической станции "Космос" в Сибирском международном центре синхротронного излучения на канале накопителя релятивистских электронов ВЭПП4. Комплекс аппаратуры для калибровки включал в себя монохроматор, выделяющий заданную длину волны из белого пучка синхротронного излучения от накопителя ВЭПП-4 [Николенко и др., 2012]. Интенсивность полученного монохроматического излучения определялась с помощью эталонного детектора.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ КАЛИБРОВКИ

Калибровка проводилась для лётного образца прибора ВУСС-Э для геостационарного космического аппарата "Электро-Л №3". Результаты калибровки получены для длин волн от  $\lambda_m = 115$  нм. Верхняя граница длин волн  $\lambda_M$  изменялась в зависимости от условий эксперимента для различных каналов ВУСС-Э — от 185 до 225 нм. Результаты калибровки приведены на рис. 1 для каналов 3 ( $\lambda_M = 200$  нм) и 4 ( $\lambda_M = 225$  нм). Для каналов 1 и 2  $\lambda_M = 185$  нм.

Из рисунка 1 видно, что чувствительность приборов достигает максимума вблизи  $\lambda = 120$  нм и значительно падает при увеличении длины волны, что способствует подавлению сигнала от более длинноволновых участков спектра. Видно также, что чувствительность датчиков может сильно (на ~ 30%) различаться.

Солнечный спектр в рассматриваемой области длин волн характеризуется сильным возрастанием интенсивности с увеличением длины волны. Этот рост может противодействовать подавлению сигнала от длинноволновой части спектра. Для оценок использовались модельные солнечные спектры в области далекого ультрафиолетового излучения (ДУФ) для высокого и низкого уровней солнечной активности, рассчитанные в соответствии с [Нусинов и др., 2019] для спектральных интервалов шириной 1 нм. Спектры представлены на рис. 2. Интерполяция спектров проведена с помощью кубических сплайнов с шагом 1 нм в области (115-225) нм.

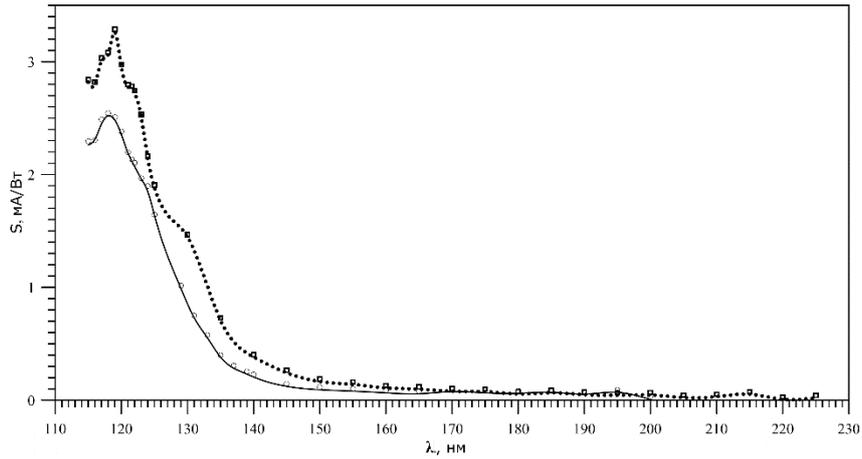


Рис. 1. Функции чувствительности для каналов 3 и 4 ВУСС-Э (значки - данные калибровки, линии-интерполяция кубическими сплайнами, сплошная линия – канал 3, пунктирная – канал 4)

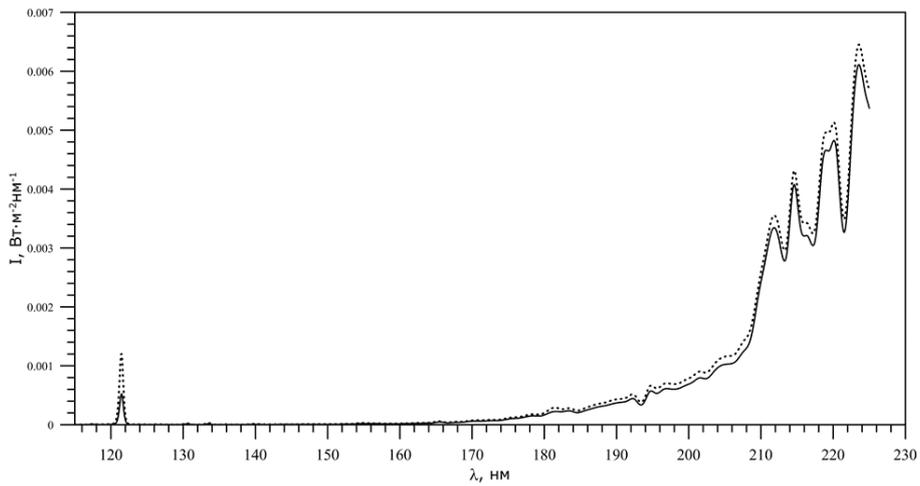


Рис. 2. Спектры ДУФ для высокой активности (пунктирная линия) и низкой активности (сплошная линия).

Из рисунка 2 видно, что потоки излучения в области длин волн свыше 180 нм значительно превышают поток вблизи  $\lambda = 120$  нм и могут, возможно, давать значительный вклад в сигнал ВУСС-Э. Поэтому наибольший интерес представляют результаты, полученные для каналов 3 и 4 (соответственно = 200 нм и  $\lambda_{max} = 225$  нм).

#### 4. ОЦЕНКА ВКЛАДА ЛИНИИ $L\alpha$ В СИГНАЛ ВУСС-Э

Для того, чтобы определить, какую долю  $P$  сигнала ВУСС-Э даёт линия Лайман-альфа, надо исследовать зависимость от длины волны свёртки функций чувствительности и интенсивности излучения от длины волны:

$$P(\lambda) = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda} S(\lambda)I(\lambda)d\lambda / \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{Max}} S(\lambda)I(\lambda)d\lambda \quad (1)$$

Величина  $P$  очевидно, изменяется от  $P = 0$  при  $\lambda = \lambda_{min}$  до  $P = 1$  при  $\lambda = \lambda_{max}$ . Значения  $P$  рассчитывались для значений интенсивностей излучения в линии  $L\alpha$  при низком и высоком уровнях солнечной активности (соответственно 5.1 и 11 мВт·м<sup>-2</sup>). При расчетах интегрирование в (1) заменялось суммированием по всем участкам длин волн шириной 1 нм. Использовалась интерполяция результатов калибровки и спектра с помощью кубических сплайнов. Результаты расчетов представлены на рис. 3.

Видно, что для канала 3 вклад от линии составляет ~60% при низкой солнечной активности и ~70% при высокой активности. Для канала 4 вклад составляет соответственно ~30% и ~45%. Можно предположить, что более низкая величина вклада от излучения в линии  $L\alpha$  для канала 4 обусловлена большей шириной спектрального интервала (до 230 нм вместо 200 нм). Как видно из рис. 2, этот участок соответствует резкому увеличению спектральной плотности излучения Солнца, что и дает существенный вклад в сигнал ВУСС-Э, несмотря на снижение чувствительности прибора в этой области спектра. Поэтому при дальнейших работах по калибровке аппаратуры следует считать необходимым расширение диапазона измерений в область выше 230 нм.

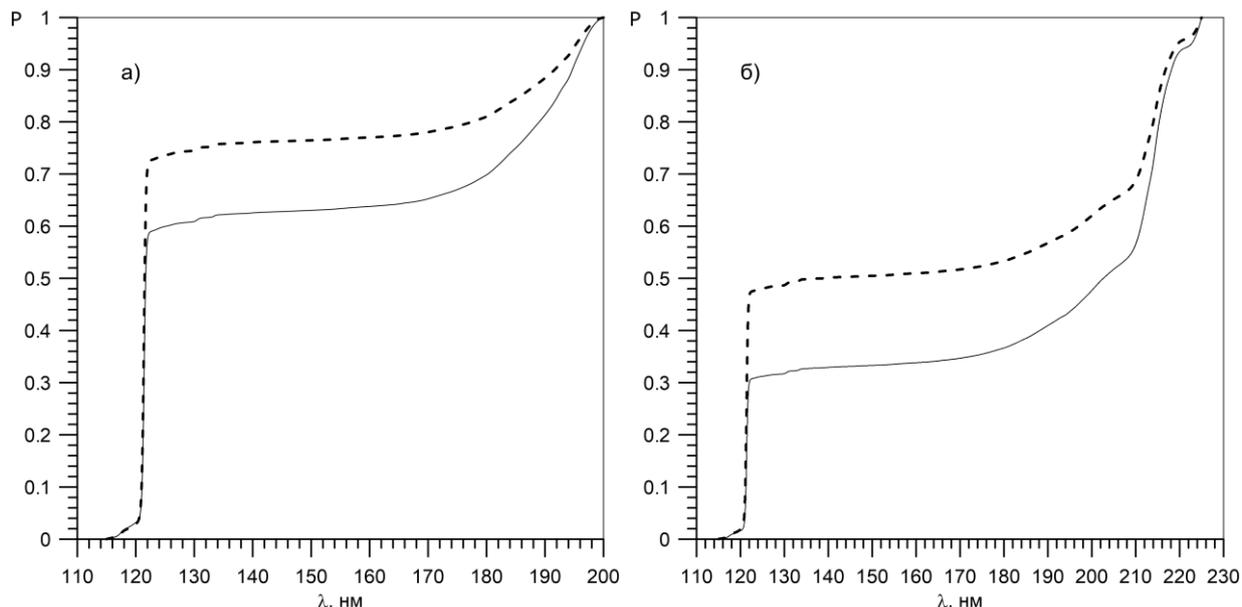


Рис. 3. Вклад участка спектра от 115 нм до заданной длины волны в сигнал ВУСС-Э.

а) – канал 3,  $\lambda_{\max}=200$  нм, б) – канал 4,  $\lambda_{\max}=225$  нм. Сплошные линии – низкий уровень активности,  $I L\alpha=3.1 \cdot 10^{15}$  м-2с-1, штриховые – высокий уровень,  $I L\alpha=7.1 \cdot 10^{15}$  м-2с-1.

Следует отметить, что с увеличением длины волны возрастает неопределенность данных о чувствительности, что может приводить к дополнительной неопределенности расчетов вклада линии  $L\alpha$  в сигнал ВУСС-Э. Поэтому необходимо также повышение точности измерений в длинноволновой части спектра.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Данные измерений прибором ВУСС-Э неизбежно включают в себя, кроме сигнала, обусловленного потоком в линии  $L\alpha$ , еще и значительный вклад  $(1-P)$  от длинноволновой части спектра, даже при неизвестных данных о чувствительности в области длин волн выше 225 нм. Этот вклад зависит от уровня солнечной активности и его следует учитывать при мониторинге космической погоды.

2. Из-за отличий чувствительности каждого прибора необходима калибровка каждого прибора и определение величины  $P$  для длины волны, соответствующей линии Лайман-альфа перед установкой прибора на КА.

## ЛИТЕРАТУРА

- Николенко А. Д., Авакян С. В., Афанасьев И. М. и др. Станция "Космос". Использование синхротронного излучения из накопителя ВЭПП-4 для метрологических измерений в ВУФ и мягком рентгеновском диапазонах // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2012. №5. С. 13-19.
- Нусинов А.А., Казачевская Т.В., Катюшина В.В. Модель потоков далекого ультрафиолетового излучения Солнца // Геомагнетизм и аэрономия, 2019, том 59, № 3, с. 1–7.

- Нусинов А.А., Казачевская Т.В., Катюшина В.В., Свидский П.М., Гонюх Д.А. Вариации потоков крайнего ультрафиолетового излучения с различными масштабами времени по измерениям на ИСЗ "КОРОНАС" (Эксперимент СУФР-СП-К и ВУСС-Л) // В кн. "КОРОНАС-Ф: вклад в солнечно-земную физику". 2008. НАУКА. С. 259-294.
- Woods T.N., Eparvier F.G., Harder J., Snow M. Decoupling Solar Variability and Instrument Trends Using the Multiple Same-Irradiance-Level (MuSIL) Analysis Technique. // Solar Physics. Vol. 293, Issue 5, article id. 76, 21 pp.
- Thuillier G., Bolsée D., Schmidtke G. et al. The Solar Irradiance Spectrum at Solar Activity Minimum Between Solar Cycles 23 and 24 // Solar Physics. V. 289, Issue 6. P.1931-1958
- Schmidtke G. Extreme ultraviolet spectral irradiance measurements since 1946 // History of Geo – and Space Sciences. 2015.V. 6. P. 3–22. www.hist-geo-space-sci.net/6/3/2015/ doi:10.5194/hgss-6-3-2015

## METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF EQUIPMENT FOR SATELLITE MONITORING OF THE GEOEFFECTIVE ULTRAVIOLET RADIATION OF THE SUN

A.A. Nusinov, A.V. Alekseeva, P.S. Zavertkin, D.V. Ivlyushkin, YU. M. Kachanovskiy, S.V. Kuzin, V.T. Minligareyev, A.D. Nikolenko, Ye.A. Pan'shin, A.A. Pertsov

The results of calibration of new semiconductor detectors for monitoring the solar ultraviolet radiation flux in the Lyman-alpha line ( $L_{\alpha}$ , 121.6 nm) onboard the geostationary spacecraft "Electro" of the Russian Hydro-meteorological service are presented. Calibration was carried out due to the source of synchrotron radiation of relativistic electrons on the channel of the electron storage ring VEPP4. A radiation beam in individual narrow parts of the spectrum was formed by using the "Cosmos" metrological complex at the Siberian International Center for Synchrotron Radiation. of relativistic electrons of the Institute of Nuclear Physics SB RAS .. The analysis of spectral sensitivity curves showed that the sensitivity of the detectors can vary greatly (by ~30%). Using the model spectra of the ultraviolet radiation of the Sun, the contribution of  $P$  to the detector signal from the  $L_{\alpha}$  line and from the spectral region above ~ 122 nm was calculated. As a result of the analysis of model calculations for various levels of activity, it was shown that the value of  $P$  can be very different for different sensors:  $P$  is 30% –60% at a low level of solar activity and 50% –70% at high level. This result indicates the need to calibrate all the channels of each flight instrument and take into account, when monitoring space weather, the dependence of the contribution  $P$  to the VUSS-E signal from the  $L_{\alpha}$  line on the solar activity level.

**KEYWORDS:** UV SUN RADIATION, SOLAR SPECTROPHOTOMETERS, CALIBRATION