

УДК 523.985, 520.6.05, 53.082.77

ИЗМЕРЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА НА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А. А. Нусинов, Ю. М. Качановский, В. Т. Минлигареев, И. С. Юдкевич

Поступила в редакцию 02.10.2017 г.

Рассмотрены характеристики аппаратуры для мониторинга на геостационарных ИСЗ рентгеновского излучения Солнца в области длин волн короче 0.8 нм. В качестве детектора излучения используется торцовый счётчик Гейгера СБТ-9. Исходя из результатов калибровки счётчиков и характеристик солнечного спектра в рентгеновской области длин волн разработан метод обработки измерений для измерителей потока рентгеновского излучения Солнца ДИР-Э геостационарных КА "Электро-Л" и последующего приведения этих измерений к стандартному, принятому в международной практике виду – потоку энергии в диапазоне (0.1–0.8) нм.

Разработана эталонная база для ДИР-Э и проведены экспериментальные исследования характеристик на технологическом образце прибора. Разработана методика калибровки ДИР-Э для использования в измерениях на перспективных космических аппаратах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Солнечное рентгеновское излучение, измерение потока рентгеновского излучения, калибровка аппаратуры, эталонная калибровочная база.

1. ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

При проведении гелиогеофизических наблюдений (мониторинга космической погоды) с космических аппаратов (КА) измеряются характеристики проникающего ионизирующего электромагнитного излучения Солнца — крайнего ультрафиолетового (КУФ) (10–105 нм) и мягкого рентгеновского излучения в области (0.01–10) нм.

Одними из наиболее важных факторов гелиогеофизического мониторинга являются солнечные вспышки, оказывающие существенное влияние на верхнюю атмосферу и ионосферу. Солнечная вспышка сопровождается относительно кратковременным сильным увеличением потока мягкого рентгеновского излучения (0,01 – 10 нм), гораздо более слабым увеличением потока в интервале от 10 до 105 нм и слабым (не более 10 % для самых мощных вспышек) увеличением потока в полосе вблизи 120 нм. Изменения в ионосфере (в освещенной ее части), сопровождающие такие явления, обычно называют внезапными ионосферными возмущениями (ВИВ).

Основное свойство интенсивных ВИВ — это увеличение электронной концентрации (N):

- на порядок и более в области D ионосферы;
- от 10 до 30 % в максимуме E-слоя;
- от 10 до 30 % в области F ионосферы.

Механизмы и конкретные проявления ВИВ областей D и E ионосферы в общих чертах известны – это увеличение скорости ионизации атмосферы, связанное с Солнечной вспышкой. Изменения N во внешней ионосфере, по-видимому, связаны с увеличением потока солнечного излучения в интервале от 10 до 10⁵ нм. Согласно результатам моделирования, даже кратковременное (около 15 мин) увеличение этого потока на 30 % приводит к увеличению в несколько раз направленного вверх потока плазмы над максимумом F2-слоя. Этот поток обеспечивает увеличение N во внешней ионосфере, максимум такого увеличения приходится на время после «выключения» ионизации, связанной со вспышкой. Во время сильных солнечных вспышек возмущения полного содержания электронов (ПЭС) в столбе единичного сечения могут достигать нескольких единиц ПЭС при среднем уровне в несколько десятков единиц, а возмущения геомагнитного поля могут достигать десятков нТл в средних широтах. Ясно, что мониторинг рентгеновского излучения Солнца крайне важен для регистрации и идентификации происхождения таких возмущений.

Обработка сигналов GPS показывает, что во время вспышек до 30 % приращения ПЭС приходится на высоты $h > 300$ км. Таким образом, солнечная вспышка сопровождается увеличением N на всех высотах ионосферы, и относительный вклад внешней ионосферы в это увеличение может быть существенным.

Кроме того, вспышка может сопровождаться увеличением потока солнечных протонов – солнечных космических лучей (СКЛ) высоких энергий которые также являются источником аномальной ионизации D-области ионосферы в полярных районах. Проникая через геомагнитное поле в ионосферу в высоких широтах во время мощных солнечных протонных событий, они могут модифицировать полярную ионосферу в течение нескольких дней (т.н. поглощение в полярной шапке). Эффекты ВИБ и поглощения в полярной шапке являются важными эффектами космической погоды, так как существенно изменяют условия распространения радиоволн. Перечисленные факторы обуславливают важность наблюдения потоков ультрафиолетового и рентгеновского излучения от всего Солнца как звезды, а также высыпаний высокоэнергичных частиц. Кроме того, важность измерений мягкого рентгеновского излучения обусловлена тем, что оно является крайне чувствительным индикатором солнечной активности.

Измерения на КА на протяжении десятилетий привели к выбору наиболее удобного диапазона измерений для мониторинга. Систематические измерения рентгеновского излучения ведутся на КА США в течение почти 50 лет. В настоящее время наблюдения ведутся на геостационарных КА типа «GOES» в диапазонах длин волн (0,05–0,4) нм и (0,1–0,8) нм. Классификация рентгеновских вспышек (а иногда и фонового уровня излучения) осуществляется по величине потока энергии I_8 в диапазоне от 0,1 до 0,8 нм - так называемому рентгеновскому классу. Эта классификация представлена в таблице 1.

Таблица 1. Классификация рентгеновских вспышек.

№ п.п	Класс рентгеновской вспышки	Поток энергии в максимуме, мкВт·м ⁻²
1	A1-A9	0,01 – 0,099
2	B1-B9	0,1 – 0,99
3	C1-C9	1 – 9,9
4	M1-M9	10 – 99
5	X1 и более	100 и более

К заметным ионосферным эффектам могут приводить только вспышки класса C и более. В настоящее время точность измерений потоков рентгеновского излучения становится всё более высокой и погрешность измерений в районе энергий ~ 3 кэВ не превышает ~ 20 %.

На российских геостационарных КА типа «Электро-Л» (рис.1) устанавливаются измерители потока рентгеновского излучения Солнца ДИР-Э, предназначенные для измерения плотности потока рентгеновского излучения Солнца в области энергии от 3 до 25 кэВ (0,05 – 0,4 нм) с плотностью потока ($10^3 \div 10^7$) см⁻²с⁻¹ср⁻¹.



Рис. 1. Геостационарный КА «Электро-Л» в сборочном цеху и на орбите.

Эти характеристики не позволяют непосредственно выполнять классификацию вспышек общепринятым во всем мире способом (в соответствии с табл. 1), а также сопоставлять измерения с результатами наблюдений КА «GOES».

Одним из важных применений одновременных измерений рентгеновского излучения и КУФ является оценка потоков протонов солнечных вспышек. При одном и том же уровне потока мягкого рентгеновского излучения протонные события, сопровождаются потоками КУФ в несколько раз большими, чем при отсутствии протонов. В [1] приведены соотношения, позволяющие разделить протонные и непротонные события, исходя из данных о потоках КУФ и потоках мягкого рентгеновского излучения. Это позволяет затем оценить потоки протонов по КУФ-излучению. Таким образом, с помощью одновременных измерений рентгеновского и ультрафиолетового излучений оказывается возможным распознавание радиационно-опасных событий на Солнце и оценка потока протонов практически в момент прихода электромагнитного излучения от вспышки к Земле.

Важнейшими характеристиками солнечного излучения являются спектр и полный поток излучения. Именно эти характеристики, в конечном счёте, и являются целью мониторинга геоэффективных электромагнитных излучений. Вследствие того, что излучения, формирующие ионосферу и верхнюю атмосферу, полностью поглощаются уже на высотах ~ 90 км, их измерения принципиально возможны только на КА.

2. ОСОБЕННОСТИ ПРОВОДИМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерительная аппаратура для измерений КУФ — ВУСС-Э и рентгеновского излучения — ДИР-Э на геостационарных КА «Электро-Л» устанавливается на кронштейне панели солнечных батарей (рис. 2). ВУСС-Э — измеритель ультрафиолетового излучения Солнца, предназначенный для измерения плотности потока энергии ультрафиолетового излучения Солнца вблизи линии H α (121,6 нм) в диапазоне $(1\div 30)$ мВт·м $^{-2}$ и работающий совместно с ДИР-Э.

Плоскость панели должна быть перпендикулярной плоскости экваториальной орбиты КА. Расположение измерительных средств на кронштейне панели солнечной батареи широко применяется на геостационарных КА «GOES» в США, в России используется впервые. Необходимость такого положения приборов обусловлена тем, что основная ось визирования КА направлена в надир, что препятствует непрерывному наблюдению за Солнцем. В то же время, конструкция КА предусматривает постоянно действующую систему слежения за Солнцем панелей солнечных батарей, при допустимом уходе направления на Солнце от вектора нормали к плоскости солнечной батареи около $7\text{-}8^\circ$.

Размещение приборов ДИР-Э на кронштейне панели солнечной батареи показано на рис. 2. Для частичной компенсации годового изменения высоты Солнца относительно плоскости орбиты КА, приборы установлены под углом $\gamma=11,5^\circ$ к плоскости батареи, что составляет примерно половину от максимального угла солнечного склонения $\delta_{\max}=23,5^\circ$.

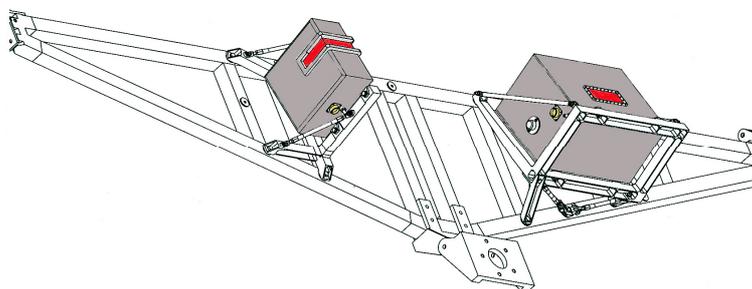


Рис. 2. Расположение приборов на панели солнечных батарей.
Слева - ДИР-Э, справа - ВУСС-Э

Особенностью условий работы аппаратуры КА «Электро-Л» является то, что приборы практически всегда смотрят на Солнце «искоса». Поскольку диаграмма направленности прибора не изотропна и сильно зависит от угла между направлением на Солнце и осью прибора, должна предусматриваться коррекция показаний прибора на эту зависимость.

3. РЕШАЕМАЯ ЗАДАЧА

В качестве датчика рентгеновского излучения ДИР-Э используется счётчик Гейгера СБТ-9. Отличие от широко известных измерений на системе геостационарных КА GOES состоит в том, что на GOES измерения проводятся при помощи двух ионизационных камер [2], с различной полосой пропускания. Ток ионизационной камеры пропорционален потоку энергии рентгеновского излучения в спектральной полосе чувствительности каждой из камер. Кривые чувствительности ионизационных камер КА GOES (с 1-го по 12-й) представлены на рис 3. Границы спектральной полосы чувствительности определяется из условия уменьшения чувствительности на порядок по сравнению с максимальной. Эти границы соответствуют полосам (0,05-0,4) нм и (0,1-0,8) нм.

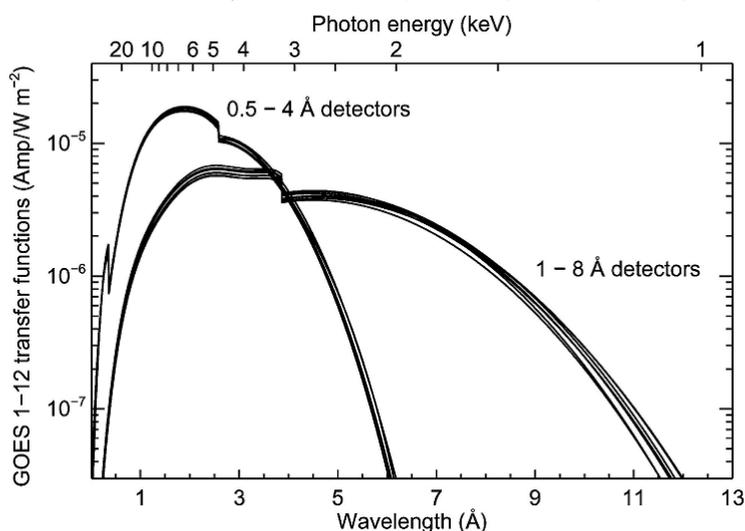


Рис. 3. Зависимость чувствительности ионизационных камер аппаратуры XRS для КА GOES [3].

Указанные выше диапазоны стали к настоящему времени стандартными для характеристики солнечной активности при мониторинге космической погоды.

Измерения в двух полосах рентгеновского излучения позволяют определить температуру и меру эмиссии в соответствии с методом, предложенным в работе [4]. Один из последних вариантов усовершенствования метода на основе новых расчётов спектра предложен в [3].

Поскольку измерения мягкого рентгеновского излучения на КА “Электро-Л” проводятся, в отличие от GOES, при помощи счётчика Гейгера, необходимо развить метод определения потока энергии излучения исходя из скорости счета.

Прежде всего, необходимо выбрать спектр, используемый для расчётов. В настоящее время для работы с данными GOES используют теоретические спектры из современной базы физических данных CHIANTI [5, 6]. Примеры таких спектров приведены на рис. 3 из [3], где представлено сопоставление двух спектров [6] и [7].

В работе [8] показано, что спектр, рассчитанный исходя из полного учёта всех процессов излучения (свободно-свободные переходы, свободно-связанные переходы, диэлектронная рекомбинация и эмиссия линий) может быть с точностью около 15% рассчитан исходя из простой функции лучистых потерь

$$L(E, T) = 2.59 \cdot 10^{-20} \frac{1}{\sqrt{T}} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right), \tag{1}$$

где E — энергия кванта, k — постоянная Больцмана, T — температура плазмы.

На рисунке 4 штриховой линией показан спектр (1) с для температуры $T=10^6$ К и соответственно подобранной мерой эмиссии. Видно, что такой подбор позволяет добиться практически полного совпадения непрерывных участков спектра. В рассматриваемой области длин волн $\lambda \leq 0.8$ нм вклад эмиссионных линий в поток энергии не превышает несколько процентов [3], поэтому для дальнейших оценок будем использовать соотношение (1).

Интегрируя (1) по энергии от E до ∞ , можно получить для каждого из интервалов:

$$I_8 = A \cdot \sqrt{T} \exp\left(-\frac{E_8}{kT}\right), \quad I_4 = A \cdot \sqrt{T} \exp\left(-\frac{E_4}{kT}\right), \quad (2)$$

где коэффициент A включает в себя меру эмиссии и ослабление излучения с расстоянием, E_4 и E_8 – энергия квантов при длине волны, соответствующей верхней границе каждого из интервалов.

Из (2) следует:

$$kT = \frac{E_4 - E_8}{\ln \frac{I_8}{I_4}}, \quad (3)$$

т.е. температура может быть определена, если известны потоки I_8 и I_4 .

Соотношение между этими потоками следует степенному закону и получено по данным различных КА GOES в [9], в основном, для вспышек:

$$I_8 = 0.2009 I_4^{0.72}, \quad (4)$$

где величины потоков выражены в $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$. Это соотношение получено для вспышек всех классов (от А до Х – табл.1) и может быть уточнено при разделении вспышек на отдельные классы [9].

Комбинируя (3) и (4), можно рассчитать температуру в области вспышки. Результаты расчётов для вспышек различной интенсивности приведены на рис. 5.

При известной температуре величина A , входящая в (2), может быть определена по баллу вспышки в виде:

$$A = \frac{I_8}{\sqrt{T}} \exp(E_8/kT). \quad (5)$$

Переходя в (1) от распределения интенсивности излучения по энергии к распределению потока квантов N_λ по длине волны λ , и используя (5), можно получить:

$$N_\lambda = \frac{I_8}{kT} e^{\frac{E_8}{kT}} \cdot \frac{e^{-\frac{hc}{\lambda kT}}}{\lambda}, \quad (6)$$

где h – постоянная Планка, c – скорость света.

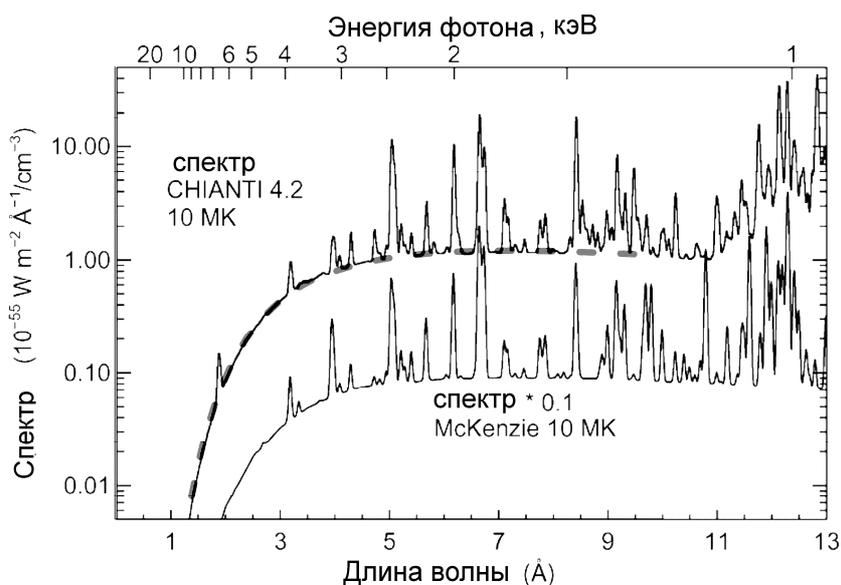


Рис. 4. Сравнение спектров [6], [7] и спектра тормозного излучения (штриховая линия) при $T = 10$ МК.

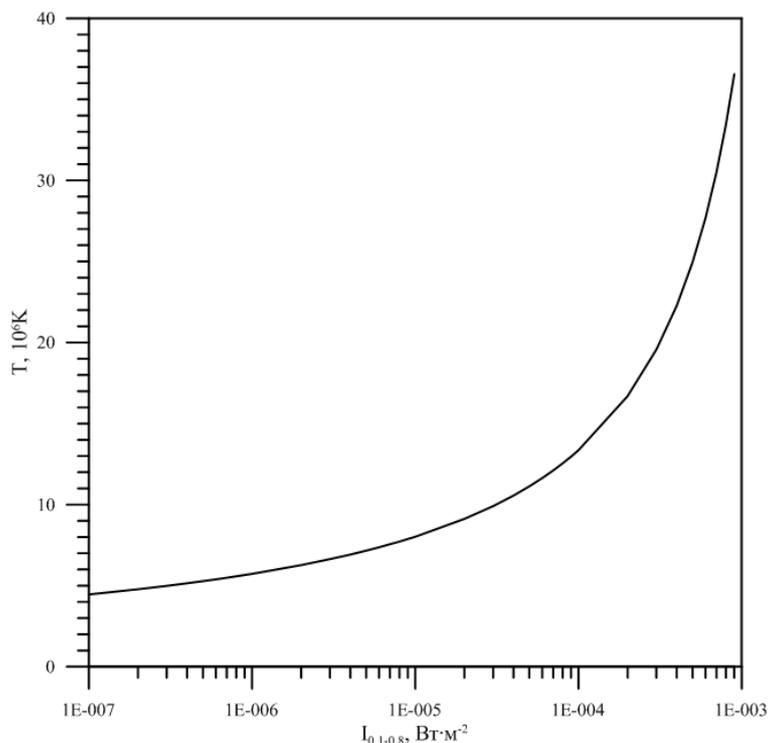


Рис. 6. Зависимость температуры плазмы от интенсивности вспышки в области 0.1-0.8 нм.

Тогда поток квантов N_4 в области короче 0.4 нм может быть вычислен как

$$N_4 = \int_0^4 N_\lambda d\lambda, \tag{7}$$

а скорость счёта детектора – как

$$V = Z \cdot \int_0^4 S(\lambda) N_\lambda d\lambda, \tag{8}$$

где Z – площадь окна счетчика.

Первый из этих интегралов относится к классу экспоненциальных интегралов и существует в смысле главного значения. Во второй интеграл входит табличная функция чувствительности $S(\lambda)$. Значения этой функции при различных длинах волн λ определялись экспериментально при калибровке приборов.

4. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И КАЛИБРОВКА ПРИБОРА ДИР-Э

Необходимым условием качества проведения гелиогеофизического мониторинга является достижение требуемой точности, достоверности и сопоставимости результатов измерений. Существенное повышение качества гелиогеофизических наблюдений может быть обеспечено только при условии внедрения системы метрологического обеспечения (МЛО) целевой аппаратуры КА.

В ФГБУ «ИПГ», как базовой организации Метрологической службы Росгидромета в области космической погоды впервые в стране были проведены работы по созданию распределенной эталонной базы для калибровки целевой аппаратуры гелиогеофизического назначения, в т.ч. измерителя ДИР-Э [10,14]. В 2015 г. первый этап создания такой эталонной базы был завершён.

До создания эталонной базы предпринимались попытки исследования метрологических характеристик детекторов рентгеновского излучения. Например, чувствительность детектора (торцевого счетчика Гейгера СБТ-9 с фильтром из алюминиевой фольги толщиной 2 мкм) была исследована в ВНИИМ им. Д.И. Менделеева [11]. Ниже рассматриваются результаты измерений, при которых ось детектора направлена на источник излучения. На рис. 7 представлены результаты измерений зависимости чувствительности от энергии и длины волн.

Из рисунка 7 видно, что границы полосы чувствительности близки к величинам 3 и 25 кэВ, т.е. к длинам волн рентгеновского излучения 0,05 и 0,4 нм.

В результате работ по созданию эталонной базы была создано рабочее место для измерителя потока рентгеновского излучения Солнца ДИР-Э. На рабочем месте калибровка ДИР-Э по плотности потока фотонов φ , выполнялась методом прямых измерений в полях рентгеновского излучения эталонных радионуклидных источников ^{55}Fe и ^{109}Cd а также методом замещения детектора эталонной радиометрической установки, аттестованного по плотности потока фотонов, в поле низкоэнергетического рентгеновского излучения эталонной дозиметрической установки УЭД 5-50М государственного эталона (ГЭТ). Калибровка на установке УЭД 5-50М с генерирующим источником рентгеновского излучения проводилась при средних энергиях режимов излучения от 5 до 21 кэВ в диапазоне плотностей потоков фотонов от 10^2 до $10^5 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$.

Калибровка ДИР-Э проводилась, в соответствии с разработанной методикой [12].

Принципиальная схема калибровки по радионуклидным источникам ^{55}Fe и ^{109}Cd приведена на рис. 8.

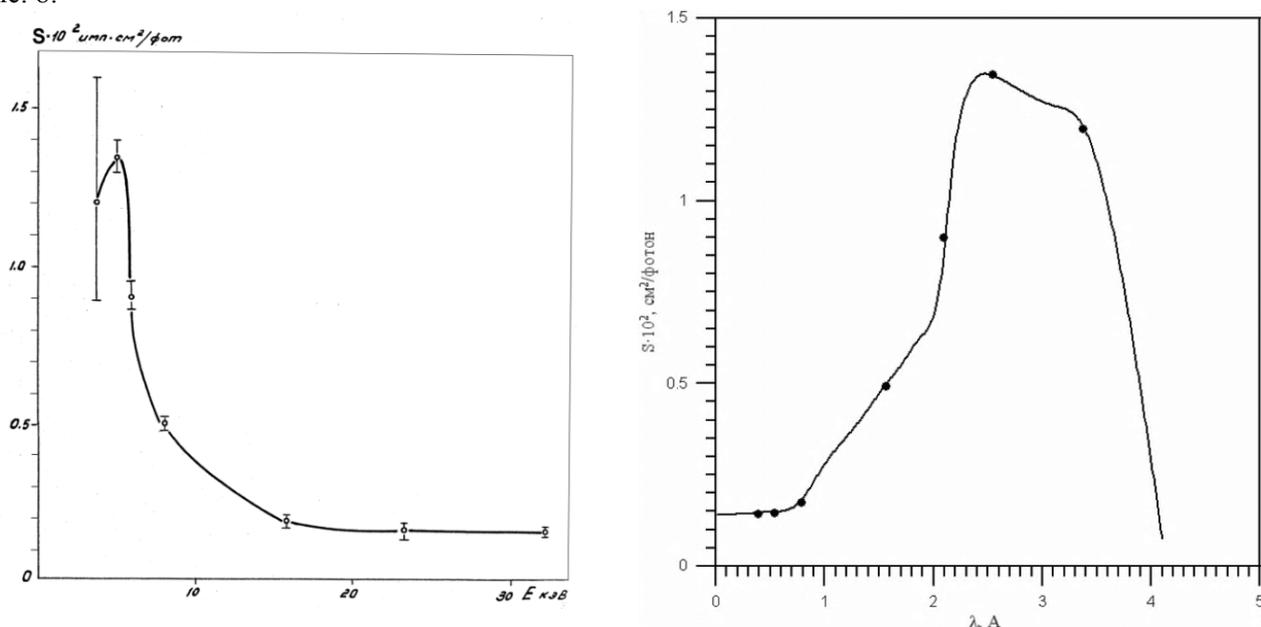


Рис. 6. Экспериментальные данные о чувствительности счётчика СБТ-9. Слева — в зависимости от энергии E , справа — от длины волны λ .

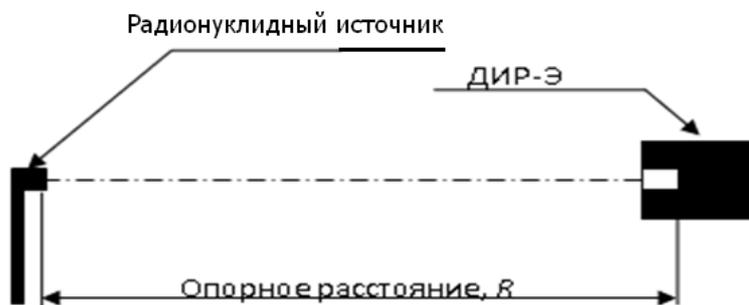


Рис. 7. Схема калибровки по радионуклидным источникам.

Схема калибровки ДИР-Э, на эталонной дозиметрической установке на рисунке приведена на рис. 8.

Отработка методики калибровки [12] на технологическом образце ДИР-Э проводилась с привлечением Государственных эталонов:

- ГЭТ 6-95 — государственный первичный эталон единиц активности радионуклидов и плотности потока альфа-, бета-частиц и потока фотонов радионуклидных источников;

- ГЭТ 8-2011 — государственный первичный эталон единиц кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы, мощности экспозиционной дозы и потока энергии рентгеновского и гамма-излучений.

Отработка методик калибровки на ГЭТ была проведена в диапазоне рентгеновского излучения (5–23) кэВ. Были применены следующие эталоны:

- рабочий эталон 1 разряда XFe 5.24 на основе радионуклида ^{55}Fe ;
- рабочий эталон 1 разряда XCd 9.06 на основе радионуклида ^{109}Cd ;
- установка УЭД 5-50М из состава ГЭТ 8-2011.

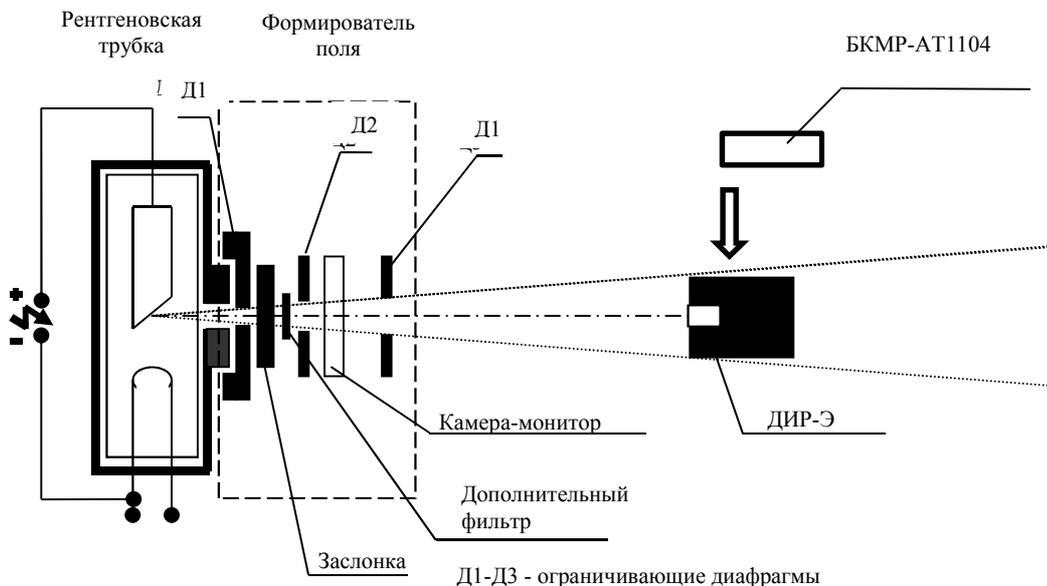


Рис. 8. Схема калибровки ДИР-Э на ГЭТ.

В процессе калибровочных работ определялась чувствительность прибора - отношение изменения скорости счета импульсов измерительного канала, к вызвавшему его изменению плотности потока бета-частиц или фотонов. Калибровка осуществлялась при одном или нескольких значениях плотности потока частиц (фотонов) в определенном диапазоне энергий излучения и для нескольких углов постановки прибора относительно геометрической оси потока частиц (фотонов).

Калибровочные работы технологического образца ДИР-Э были проведены ВНИИМ им. Д.И. Менделеева [13].

Комплекс эталонных средств, предназначенных для калибровки измерителей ДИР-Э, представлен на рис. 9.

Результаты выполненных калибровочных работ прибора ДИР-Э подтвердили правильность выбора методов оценки метрологических характеристик приборов и номенклатуры эталонных средств измерений, применяемых при калибровке.

Результаты калибровки на комплексе эталонных средств представлены на рис. 10.

Сравнение рис. 6 и рис. 10 показывает, что калибровка с помощью эталонного комплекса (рис. 10) несколько отличается от ранней (рис. 6), что приводит к некоторому сужению полосы чувствительности. Дальнейший анализ показал, что это различие не играет существенного значения.

Результаты, полученные при современной калибровке ДИР-Э:

- чувствительность прибора – $(1,0 \cdot 10^{-6} - 3,9 \cdot 10^{-4}) \text{ см}^2$;
- расширенная неопределенность результата измерений чувствительности ($k=2$) – 12%.



Рис. 9. Рабочее место для калибровки измерителя ДИP-Э по плотности потока фотонов.

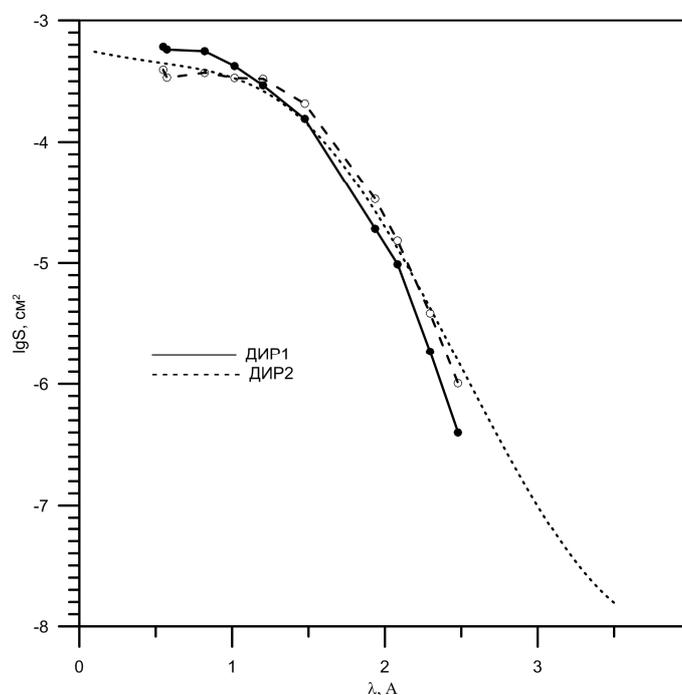


Рис. 10. Результаты калибровки приборов ДИP-Э. Пунктир – приближение сплайном (функция чувствительности $S(\lambda)$).

5. ОТКЛИК ПРИБОРА ДИP-Э НА ИЗМЕНЕНИЯ ПОТОКА СОЛНЕЧНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Знание функции чувствительности $S(\lambda)$ позволяет рассчитать отклик прибора на поток рентгеновского излучения, используя соотношения (7-8). Оба входящие в них интеграла вычислялись численно.

Для этого функция чувствительности преобразовывалась к зависимости от энергии, оцифровывалась и сглаживалась при помощи сплайнов с разбиением $0,01\text{Å}$. Результат такого преобразования представлен на рис. 6 и 10. Точками указаны экспериментальные данные.

Расчеты отклика детектора проводились для различных баллов вспышек: от В1 ($I_8=10^{-7}\text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$) до Х9 ($I_8=9\cdot 10^{-4}\text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$). Площадь детектора Z принималась равной $0,05\text{ см}^2$, что соответствует размеру диафрагмы перед окном счётчика. Результаты расчётов приведены на рис. 11 в дважды

логарифмическом масштабе. Видно, что зависимость балла вспышки от показаний счетчика хорошо может быть описана степенным законом, ему соответствует пунктирная линия на рис. 11. соотношение

$$I_g = 4.12 \cdot 10^{-7} \cdot V^{0.73} \quad (9)$$

соответствует аппроксимирующей штриховой линии на рис. 12 и может быть использовано для оценки балла вспышек по данным показаний рентгеновского детектора на основе счетчика СБТ-9.

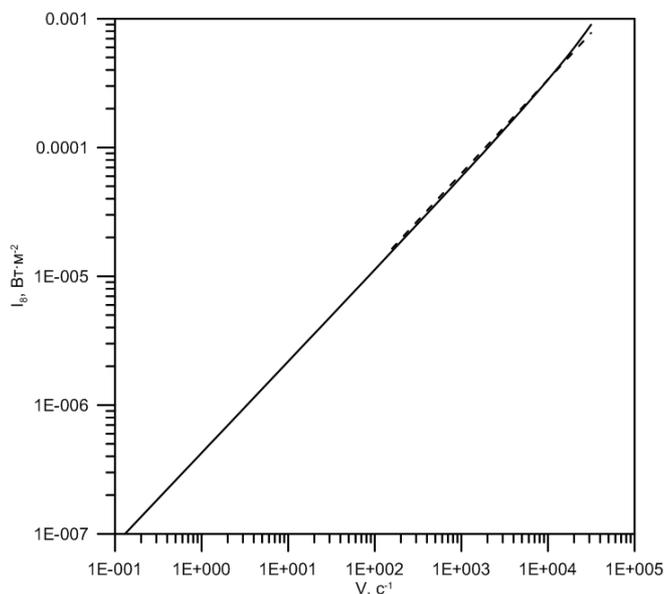


Рис. 11. Зависимость балла вспышки от скорости счета рентгеновского детектора.

Необходимо учесть, что все приведённые оценки относятся только к ситуации, когда ось детектора направлена на Солнце. В условиях измерений, когда угол между осью детектора и направлением на Солнце непрерывно изменяется, необходимо вводить поправку на зависимость чувствительности от угла.

Далее рассмотрим характер изменения эффективности регистрации с баллом вспышки. Эффективность K может быть определена как отношение скорости счета к потоку квантов в регистрируемом диапазоне длин волн: $K=V/N_4$. Изменение величины K может происходить вследствие изменения жесткости спектра с баллом вспышки. Расчеты зависимости величины K (геометрического фактора) от интенсивности рентгеновского излучения (балла вспышки) представлены на рис. 12.

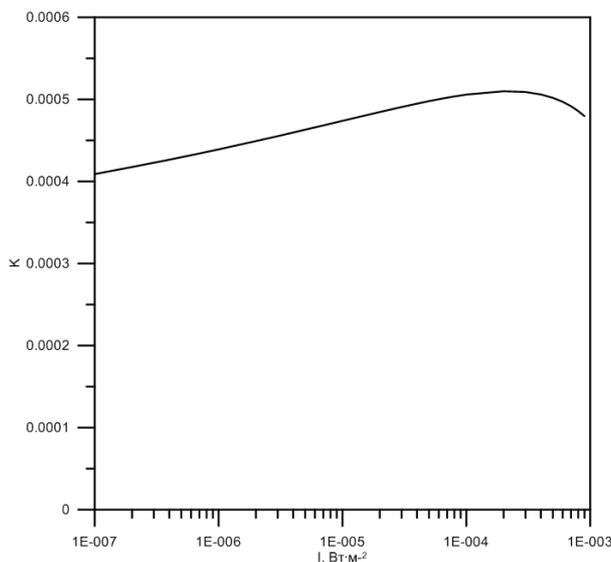


Рис. 12. Эффективность регистрации излучения в зависимости от интенсивности вспышки

Видно, что при любых уровнях вспышечных потоков эффективность изменяется мало. Поэтому для грубых оценок потока квантов можно брать среднюю величину эффективности $K=0,0047$.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан метод обработки измерений для измерителей потока рентгеновского излучения Солнца ДИР-Э геостационарных КА "Электро-Л" и последующего приведения этих измерений к стандартному, принятому в международной практике виду – потоку энергии в диапазоне (0.1–0.8) нм.

Разработана эталонная база для ДИР-Э и проведены экспериментальные исследования характеристик на технологическом образце прибора. Разработана методика калибровки ДИР-Э.

Дальнейшие исследования характеристик детекторов рентгеновского излучения Солнца необходимо направить на усовершенствование конструктивных особенностей прибора (в частности магнитов отклонения электронов), а также на анализ показаний ДИР-Э во время сильных солнечных вспышек класса X1 и более (табл.1).

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонова Л.А., Нусинов А.А. Использование измерений крайнего ультрафиолетового излучения Солнца для диагностики радиационной опасности солнечных вспышек // Известия Академии наук, сер. физическая 1995, Т.59, N 8. С. 76-80.
2. Креплин Р. У., Дир К. Р., Хоран Д. М., Микинс Дж. Ф. Спектр Солнца в области короче 10 А. //В кн.: «Поток энергии Солнца и его изменения». Под ред. О.Р. Уайт. М. Мир, 1980, С. 313—339.
3. White S. M., Thomas R. J., Schwartz R.A Updated expressions for determining temperatures and emission measures from goes soft x-ray measurements. // Solar Physics 2005. V. 227. N 2. P. 231–248
4. Garcia H. A. Temperature and emission measure from GOES soft X-ray measurements. // Solar Physics 1994. V 154: N 2. P. 275-308 .
5. Landi, E.; Feldman, U.; Dere, K. P. CHIANTI-An Atomic Database for Emission Lines. V. Comparison with an Isothermal Spectrum Observed with SUMER //The Astrophysical Journal Supplement Series. 2002, V.139, Issue 1. PP. 281-296.
6. Landi, E.; Landini, M.; Dere, K. P.; Young, P. R.; Mason, H. E. CHIANTI - an atomic database for emission lines. III. Continuum radiation and extension of the ion database //Astronomy and Astrophysics Supplement.V.135, p.339-346.
7. Walker, A. B. C., Jr.; Rugge, H. R.; Weiss, Kay. Relative Coronal Abundances Derived from X-Ray Observations. I. Sodium, Magnesium, Aluminum, Silicon, Sulfur, and Argon // Astrophysical Journal. 1974. V. 188, pp. 423-440.
8. Сомов Б.В. О вкладе рентгеновского излучения солнечной вспышки в нагрев её низкотемпературной (оптической) области. В кн.: Космические лучи в стратосфере и в околоземном космическом пространстве. Тр. Физического института АН СССР. М.:Наука. 1976, Т. 88. С. 126-142,
9. Нусинов А.А., Катюшина В.В. Возможность определения рентгеновского класса вспышек по данным измерений в полосе 0,05–0,4 нм. Гелиогеофизические исследования. 2012. Выпуск 2. С. 5–8. Электронный ресурс: <http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=108>.
10. Создание распределенной эталонной базы для радиометрической аппаратуры гелиогеофизических комплексов космических аппаратов гидрометеорологического назначения [Текст] В.Т. Минлигареев [и др.] // Мир измерений. – 2016. - № 1. (С. 51 - 59).
11. Диагностика метрологических характеристик радиометрической аппаратуры для измерения потоков рентгеновского излучения и протонов высоких энергий (аппаратуры РМК-РП). Заключительный отчет ИПГ по теме V.47.108. № госрегистрации 79010194. М.: 1980.
12. СК 03-РП-Отд. № 210-01-09-2015-Т. Методика калибровки приборов ДИР-Э из состава гелиогеофизического аппаратного комплекса ГГК-Э на рентгеновском излучении в диапазоне энергий фотонов от 4 кэВ до 23 кэВ - СПб.: ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», 2015.
13. RU 01 № 210-59/15. Протокол калибровки измерителя потока рентгеновского излучения Солнца ДИР-Э. - СПб.: ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», 2015.
14. Минлигареев В.Т., Качановский Ю.М., Панышин Е.А., и др. Создание эталонной базы для калибровки приборов гелиогеофизического комплекса космических аппаратов гидрометеорологического назначения // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. Приложение за 2015 г. - М: АО «Корпорация ВНИИЭМ», 2015.- С.183-192.

MEASUREMENTS OF SOLAR X-RAY RADIATION ON SPACECRAFTS OF HELIOGEOPHYSICAL DESIGNATION

A. A. Nusinov, Yu. M. Kachanovsky, V. T. Minligareev, I. S. Yudkevich

The characteristics of the equipment for monitoring X-ray solar radiation onboard geostationary satellites in the wavelength region shorter than 0.8 nm are considered. The radiation detector is used the Geiger end-window counter SBT-9. Based on the results of calibration of counters and characteristics of the solar spectrum in the X-ray region of wavelengths, a method for processing measurements for the X-ray flux meters of the DIR-E of geostationary spacecraft "Electro-L" was developed and then converting these measurements to the standard form accepted in international practice - in the range (0.1-0.8) nm. A reference base for DIR-E was developed and experimental studies of the characteristics on the technological sample of the device were carried out. The calibration procedure of DIR-E for use in measurements on perspective space vehicles was also developed.

KEYWORDS: SOLAR X-RAY RADIATION, X-RAY FLUX MEASUREMENT, INSTRUMENT CALIBRATION, REFERENCE CALIBRATION BASE.