

УДК 523.9-739

**ВОЗМОЖНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО КЛАССА ВСПЫШЕК
ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ В ПОЛОСЕ 0,05 – 0,4 НМ**

А.А. Нусинов, В.В. Катюшина

В настоящее время общепринятой является классификация мощности солнечных вспышек на основе измерений в области 0,1-0,8 нм на геостационарных ИСЗ *GOES*. В рамках создания мониторинга условий в околоземном космическом пространстве на российских ИСЗ серии «Электро» используется детектор с областью чувствительности 0,05-0,4 нм. Предлагается метод классификации солнечных вспышек по измерениям на борту ИСЗ «Электро».

Ключевые слова: Солнце, ионосфера, рентгеновское излучение, вспышки, моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Результаты измерения на ИСЗ потоков мягкого рентгеновского излучения (МР) широко используются в научных и прикладных исследованиях и являются одним из важнейших индикаторов космической погоды. Систематический мониторинг мягкого рентгеновского излучения (МР) успешно осуществляется свыше 40 лет аппаратурой, установленной на американских геостационарных метеорологических спутниках *GOES* Национальной службой атмосферы и океанов США (*NOAA*). Применяемые для этих целей рентгеновские детекторы представляют собой ионизационные камеры, которые позволяют измерять интенсивность излучения в двух широких интегральных каналах 1-8 Å (1,5-12,4 кэВ) и 0,5-4,0 Å (3-25 кэВ).

В России систематические измерения МР до сих пор не проводятся. В рамках создания космического сегмента мониторинга условий в околоземном космическом пространстве предполагается создание системы патрульных наблюдений мягкого рентгеновского излучения Солнца. В частности, с целью мониторинга МР запланирована установка на ИСЗ серии "Электро" детекторов рентгеновского излучения, которые позволят проводить измерения МР в полосе 0,05 – 0,4 нм.

Принятая во всем мире система оценок мощности солнечных вспышек по рентгеновскому излучению (классы *C*, *M* и *X*) в настоящее время опирается на измерения потока из-

лучения в области 0,1-0,8 нм (таблица 1, см., например, [1]).

Таблица 1. Классификация вспышек по величине потока рентгеновского излучения в области 0,1-0,8 нм

Класс вспышки	Поток в максимуме, мкВт·м ⁻²	Относительная частота, %
C1-C9	1-9	67,7
M1-M9	10-90	29,3
X1-X9	100-900	3

Согласно работе [1], частота сильных ($>2 \cdot 10^{-3}$, мкВт·м⁻²) рентгеновских вспышек, вызывающих ВИБ (внезапные ионосферные возмущения), является линейной функцией площади солнечных пятен и скорости изменения площади, а мощность вспышки зависит от площади пятен в группе и геометрии группы: чем она сложнее, тем больше вероятность появления вспышки, вызывающей ВИБ.

Во время солнечных вспышек резко возрастают потоки рентгеновского излучения и, соответственно, скорости ионизации верхней атмосферы, что приводит к существенным изменениям в ионосфере (см., например, [2]). Для расчетов изменения состояния ионосферы при солнечных вспышках (прежде всего, поглощения радиоволн и полного содержания электронов в единичном столбе) требуется спектр мягкого рентгеновского излучения. Для такого рода аэрономических расчетов в [3] был получен «аэрономический» спектр рентгенов-

ского излучения вспышек, в котором в качестве входного параметра используется поток энергии $MP I_{0,1-0,8}$ в диапазоне длин волн 0,1–0,8 нм:

$$I_{0-\lambda} = C(\lambda)I_{0,1-0,8}^{D(\lambda)}, \quad (1)$$

где

$$C(\lambda) = C_0 \exp(-C/\lambda^{C_2}) \quad (2)$$

$$D(\lambda) = D_0 + D_1/\lambda \quad (3)$$

λ в нм, I_λ в $\text{мкВт} \cdot \text{м}^{-2}$, а входящие в (1-3) коэффициенты имеют следующие значения: $C_0 = 73,8$, $C_1 = 3,80$, $C_2 = 0,36$, $D_0 = 0,848$, $D_1 = 0,167$. Поток энергии $I_{\lambda_1\lambda_2}$ в любом спектральном интервале от λ_1 до λ_2 может быть вычислен, согласно (3), как $I_{\lambda_1\lambda_2} = I_{\lambda_2} - I_{\lambda_1}$, где I_λ – полный поток излучения в области длин волн короче λ .

Для примера на рис. 1 приведены дифференциальные энергетические спектры для вспышек классов C1, M1 и X1, рассчитанные по соотношениям (1-3). Для удобства величины потоков разделены на 10 для вспышек класса M1 и на 100 – для класса X1.

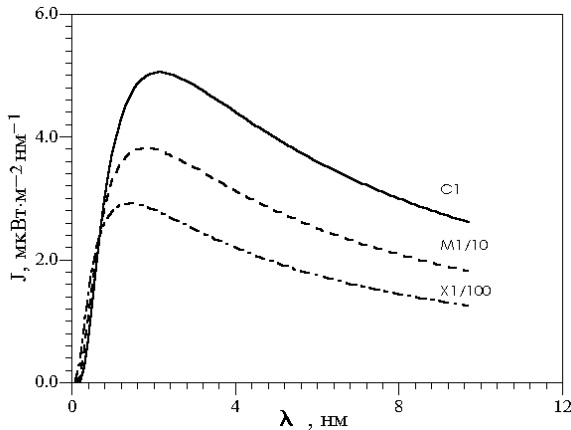


Рис. 1. Дифференциальные спектры рентгеновского излучения для вспышек различной интенсивности [3].

Вследствие технических трудностей измерений в этом диапазоне предполагается в рамках системы геофизического мониторинга (СГМ) проводить на первых порах измерения потоков рентгеновского излучения в области 0,05–0,4 нм, реализуемые значительно легче. Это приводит к необходимости пересчета измеренных вспышечных потоков в области 0,05–0,4 нм в потоки в области 0,1–0,8 нм, на базе которых основывается классификация солнечных вспышек и анализ их эффектов в ионосфере и верхней атмосфере (см., например, [3]).

СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ ПОТОКАМИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В РАЗНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИНТЕРВАЛАХ ПРИ ВСПЫШКАХ

Здесь рассматривается соотношение между потоками $I_{0,1-0,8}$ и $I_{0,05-0,3}$ во время солнечных вспышек. Анализ проводился на материале многолетних измерений потоков на ИСЗ серии GOES США [4]. Заметим, что ранее в [5] на материале измерений на ИСЗ серии SOLRAD для вспышечных условий было получено соотношение $I_{0,05-0,3} = 2,67 \cdot I_{0,1-0,8}^{1,41}$ $\text{мВт} \cdot \text{м}^{-2}$. Результаты более ранних исследований [6] по данным с ИСЗ SMS-1 дали несколько отличный результат: $I_{0,05-0,3} = 5,6 \cdot I_{0,1-0,8}^{1,4}$. Необходимо отметить, что обозначения $I_{0,05-0,3}$ и $I_{0,05-0,4}$ относятся у разных авторов к одной и той же величине, и различия в написании отражают лишь различия представлений авторов об измеряемом диапазоне длин волн излучения.

При обработке результатов измерений с ИСЗ GOES использовались данные с 5-минутным осреднением. Выбирались только импульсные вспышки. Для анализа выбирались месячные периоды. Когда наблюдалось хотя бы несколько вспышек рентгеновского класса X (порядка 10^{-4} $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ в полосе 0,1–0,8 нм) фиксировались вспышки рентгеновских классов X и M (порядка 10^{-5} $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ в полосе 0,1–0,8 нм). Для периодов, когда вспышек класса X не было, фиксировались вспышки класса M и C (порядка 10^{-6} $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ в полосе 0,1–0,8 нм). Для нескольких периодов с очень низкой активностью, когда не было вспышек класса M, зафиксированы также очень малые вспышки класса B (порядка 10^{-7} $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ в полосе 0,1–0,8 нм). Вспышки с одновременными максимальными значениями и вспышки, когда в «коротковолновой» полосе максимальное значение достигается несколько (в пределах пяти минут) раньше, чем в «длинноволновой», не разделялись. Для обеих полос выбирались максимальные значения. Рассмотрены результаты измерений 1992, 1996, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003 гг.

На рис. 2 представлен пример зависимости потока в «длинноволновой» полосе от потока в «коротковолновой» для февраля 1992 года.

По осям координат в логарифмическом масштабе представлены указанные выше потоки в единицах $\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2}$. Видно, что искомая зависимость хорошо аппроксимируется степенной функцией:

$$I_{0,1-0,8} = A \cdot I_{0,05-0,4}^B \quad (4)$$

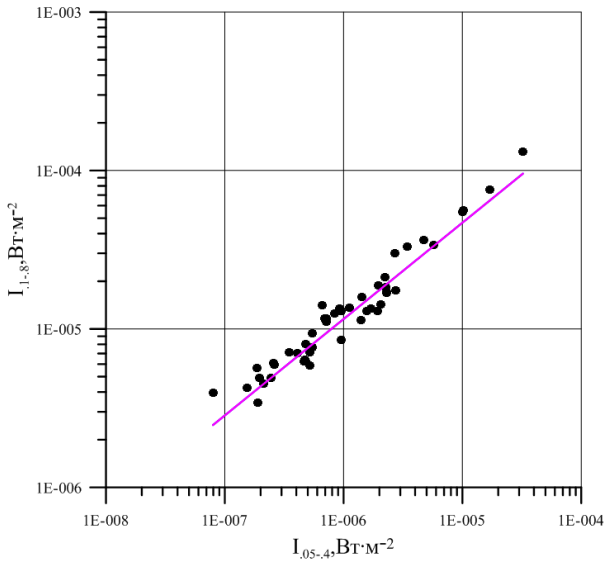


Рис. 2. Зависимость потока в «длинноволновой» (0,1-0,8 нм) полосе от потока в «коротковолновой» (0,05-0,4 нм) по данным ИСЗ GOES для февраля 1992 года.

В таблице 2 представлены коэффициенты A и B для всех рассмотренных периодов. В первом столбце – период измерений, во втором и третьем – коэффициенты A и B , в четвертом указаны рентгеновские классы вспышек, зафиксированные в указанные периоды.

В последней строке таблицы 2 даны коэффициенты, полученные по всем данным, приведенных выше измерений. Рисунок 3 демонстрирует эту зависимость. Приведены также результаты обработки в [5-6] ранних измерений на ИСЗ SMS и SOLRAD. Таблица 2 позволяет заключить, что имеется значительный (до порядка величины) разброс величин коэффициентов, характеризующих относительную величину потоков (коэффициент A). Это может быть связано с непостоянством относительных калибровок в указанных полосах на различных аппаратах серии GOES. Однако различия значений коэффициентов B , определяющих наклон прямой, аппроксимирующей зависимость, невелики. К такому же выводу можно прийти и при рассмотрении рис. 3. На нем показана зависимость потока в «длинноволновой» (0,1-0,8 нм) полосе от потока в «коротковолновой» (0,05-0,4 нм) по всем периодам, представленным в Таблице 1, сведенным в один массив. Видно, что все точки – от самых низких значений, практически характеризующих спокойные условия, до супервспышек (порядка 10^{-3} Вт·м $^{-2}$ ·сек $^{-1}$) – хорошо ложатся на одну прямую.

Однако при более детальном рассмотрении таблицы можно заметить тенденцию уменьше-

ния коэффициента B при уменьшении энергии вспышки. Чтобы проверить это из всех данных таблицы 1. были выбраны отдельно вспышки классов C , M , и X . На рисунке 4 они представлены соответственно синим, зеленым и красным цветами. Полученные при этом коэффициенты A и B даны в таблице 3.

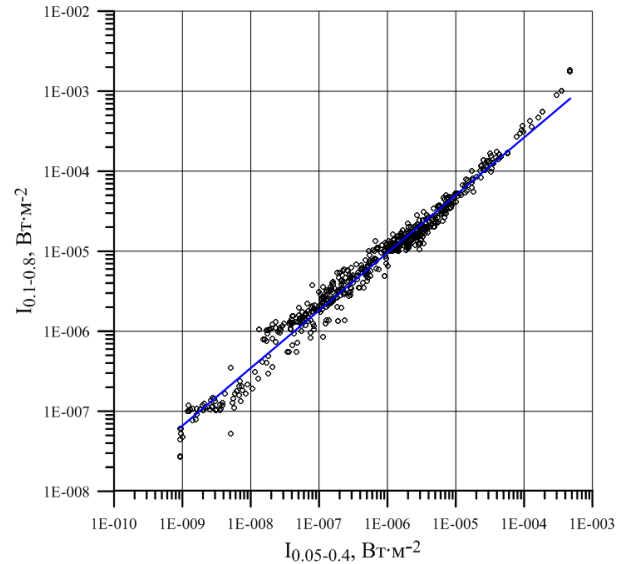


Рис. 3. Зависимость потока в «длинноволновой» (0,1-0,8 нм) полосе от потока в «коротковолновой» (0,05-0,4 нм) по всем периодам, представленным в Таблице 2, сведенным в один файл.

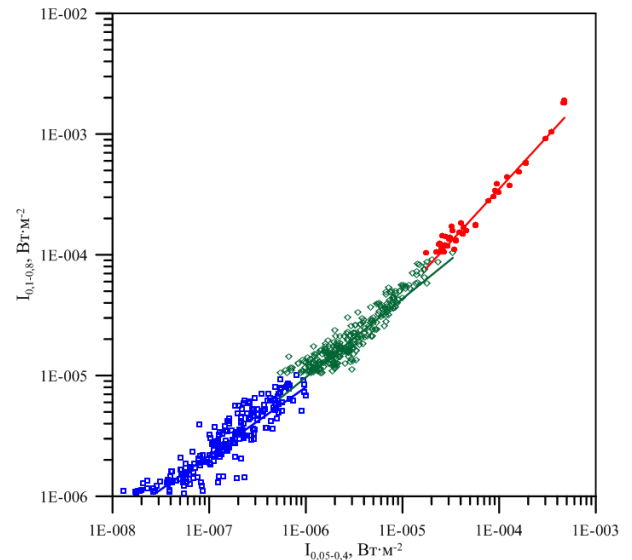


Рис. 4. Аналогично рис. 3, но разделены вспышки класса C (обозначены синим цветом), класса M (обозначены зелеными) и класса X (обозначены красным цветом).

Таблица 2. Коэффициенты степенной зависимости, характеризующей связь между потоками солнечного рентгеновского излучения в областях 0,1-0,8 нм и 0,05-0,4 нм.

Год и месяц	A	B	Рентгеновские классы вспышек
1	2	3	4
1992 02	0,0416	0,5934	M и C
1992 04	0,0421	0,6038	M и C
1992 06а	0,0708	0,6514	1-24февр., B, C, M
1	2	3	4
1992 06б	0,1006	0,6724	1-28февр., B, C, M
1992 06в	0,2153	0,7210	1-28февр., B, C, M, X
1992 08	0,1262	0,6804	M и C
1996 02	0,0281	0,6242	C и B
1996 04	0,0768	0,6951	M(1 шт), C и B
1996 04	0,0418	0,6622	C и B
1996 12	0,0836	0,6890	A, B и C
1999 08	0,1907	0,7160	M и X
2000 05	0,1041	0,6790	M и C
2000 10	0,0382	0,6034	M и C
2001 04	0,7673	0,8325	M и X
2002 04	0,5864	0,8129	M и X
2002 04	0,3060	0,7624	Только M
2002 05	0,0658	0,6471	C, M, X
2002 05	0,0528	0,6327	M и C
2002 03, 04, 05, 07, 08	0,3310	0,8377	M и X
2003 03, 02, 05, 06, 09, 10, 11	0,77648	0,8376	M и X
[5]	0,38	0,709	
[6]	0,292	0,714	
Условия без вспышек	0,0019	0,481	
Все периоды, сведенные в один массив	0,2009	0,7204	B, C, M, X, (см. рис. 3)

Таблица 3. Коэффициенты уравнения (4) для вспышек разных классов

Рентгеновский класс вспышки	A	B
X	1,084	0,872
M	0,0775	0,651
C	0,0196	0,565

Таблица 4. Классификация вспышек по рентгеновскому излучению 0,05-0,4 нм

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
C	4,35E-08	1,14E-07	2,00E-07	2,98E-07	4,06E-07	24E-07	6,48E-07	7,81E-07	9,19E-07
M	1,06E-06	2,78E-06	4,89E-06	7,29E-06	9,94E-06	1,28E-05	1,58E-05	1,91E-05	2,125E-05
X	2,60E-05	6,81E-05	1,19E-04	1,78E-04	2,43E-04	3,13E-04	3,87E-04	4,66E-04	5,49E-04

Видно, что имеется обозначенная выше тенденция повышения показателя степени *B* с ростом интенсивности вспышки. Однако в настоящее время трудно определить, является ли она истинной или это эффект более точных калибровок приборов последних лет. В более ранние годы такие большие вспышки, как вблизи максимума 23 цикла, не наблюдались, а в 1859 году, когда наблюдалась самая большая

за историю наблюдения Солнца вспышка, до запусков искусственных спутников Земли было еще очень далеко. Тем не менее, четкая связь между коэффициентами *A* и *B* в табл. 2 и 3 дает надежду уточнить в дальнейшем полученные здесь результаты.

Рисунок 5 позволяет оценить максимальную ошибку модели, построенную с использованием этих данных. Он дает схему с двумя

наборами коэффициентов: максимальные и минимальные значения. Здесь же представлены результаты прежних исследований [5 - 6]. Видно, что для вспышек класса X ошибка может достигать 100%, а для - класса C различия сравнительно невелики (~10–15%).

Сравнивая линии 4, 5 и 6 на рис. 5, можно заключить, что в разные периоды калибровка измерительной аппаратуры на спутниках серий *SMS*, *SOLRAD* и *GOES* заметно различалась, что приводит к различиям до 100% между расчетными значениями потока $I_{0,1-0,8}$, получаемыми исходя из современных измерений и расчетами на основе данных 1970-1980-х годов.

Исходя из (4) и коэффициентов табл. 2, можно определить рентгеновский класс вспышки по планируемым на ИСЗ СГМ измерениям потока излучения вспышек в области 0,05-0,4 нм. Данные для оценок приведены в табл. 4. Потоки излучения даны в Вт·м⁻².

Каждая строка табл. 4 соответствует классу вспышки по классификации NOAA (C, M или X), а столбец – ее численной характеристике. Приведенные в таблице данные позволяют проводить сопоставление планируемых измерений СГМ с одновременными измерениями на геостационарных ИСЗ «GOES».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы сводятся к следующему.

1. В результате анализа данных за два последних десятилетия о солнечных рентгеновских вспышках получены в общем виде соотношения для расчета спектральной функции излучения Солнца при вспышках произвольного класса. Для расчета спектра необходимо знание исходного параметра – потока рентге-

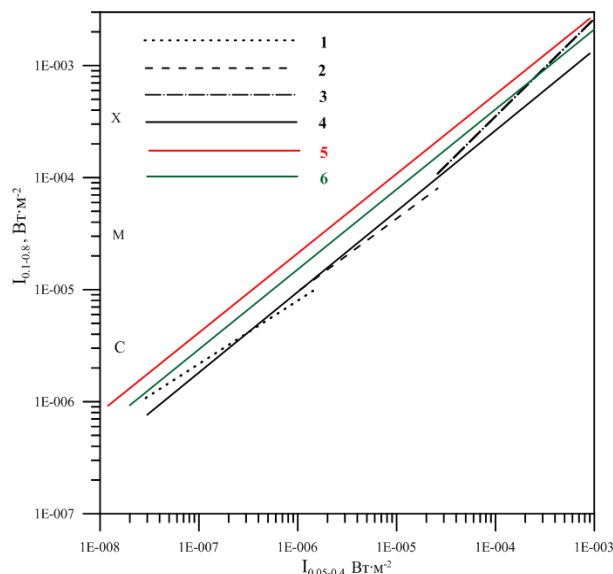


Рис. 5. Линии регрессии для зависимостей (4) для вспышек различных классов. 1 – класс C; 2 – класс M; 3 – класс X; 4 – все вспышки C; 5 – результаты [5]; 6 – результаты [6].

новского излучения вспышки в диапазоне 0,05-0,4 нм.

2. Полученные результаты позволяют проводить сопоставление перспективных результатов измерений мягкого рентгеновского излучения на ИСЗ космического сегмента мониторинга геофизической обстановки с измерениями рентгеновского патруля NOAA и, в частности, проводить классификацию вспышек по традиционной шкале.

THE ABILITY TO DETERMINE THE X-RAY CLASS OF FLARES FROM MEASUREMENTS IN THE BAND 0.05 - 0.4 NM

AA Nusinov, V.V. Katyushina

Abstract

Currently, the standard is to classify the power of solar flares on the basis of measurements of 0.1-0.8 nm onboard geostationary satellite GOES. As part of the monitoring conditions in the near-Earth space onboard Russian satellite series "Electro" as a detector, a counter is used with the sensitivity in the waveband 0,05-0,4 nm. We propose a method of classification based on measurements of solar flares on board the satellite, "Electro".

KEY WORDS: SUN, X-RAYS, FLARES, MODELING

ЛИТЕРАТУРА

1. Алтынцев А.Т., Банин В.Г., Куклин Г.В., Томозов В.М.; под ред. Степанова В.Е..Солнечные вспышки.-М.: Наука, 1982. – 246 с..
2. Qian, L; Burns, A.G., Chamberlin, P.C.; Solomon, S.C.//Journal of Geophysical Research. 2011, V. 116, No. A10. - CiteID A10309.
3. Нусинов А.А., Чуланкин Д.И.//Геомagnetизм и аэрономия. 1997, т. 37. No. 1. С. 14-23.
4. Креплин Р.У., К.Р. Дир, Д.М. Хоран, Дж.Ф. Минкинс, в кн. Поток энергии Солнца и его изменения: пер с англ./ Р.У. Креплин,; под ред. Г.М. Никольского и Я.И. Фельдштейна. М.: Мир, 1980. - С. 313-339.
5. Чуланкин Д.И.//Труды ИПГ им. акад. Е.К. Федорова, выпуск 81. – С-П.-Гидрометеиздат, 1997, С. 5-11.
6. Donnelly, R.F.//Journal of Geophysical Research. 1976. V. 81. No. 25. P. 4745-4753.