



Статистическая связь между рентгеновским излучением Солнца во время вспышки и солнечным протонным событием

А.М. Коновалихин¹, Н.А. Власова², В.В. Калегаев^{1,2}

1. Физический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

2. Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

г. Москва, Россия

Солнце – источник радиационной опасности. В результате взрывных процессов на Солнце, составляющими которых являются солнечные вспышки и корональные выбросы массы, в околоземном пространстве и иногда на наземных установках (события GLE) регистрируются мощные потоки солнечных энергичных частиц, которые могут являться возможным предвестником геомагнитных бурь и создавать угрозу экипажам и технике космических миссий и высоколетящих самолётов, а также дальней высокочастотной радиосвязи. Прогноз взрывных процессов на Солнце в настоящее время невозможен. Поэтому актуальным является краткосрочный прогноз солнечных протонных событий, основанный на экспериментальных данных по рентгеновскому излучению Солнца во время вспышек, которое регистрируется на геостационарных спутниках серии GOES через ~8 минут после вспышки. Представлены результаты исследования по поиску связи между флюенсом рентгеновского излучения Солнца во время солнечной вспышки в диапазоне длин волн 0,1–0,8 нм и солнечным протонным событием.

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики (проект «Ядерная и радиационная физика»).

На сайте центра данных оперативного космического мониторинга (ЦДОКМ) НИИЯФ МГУ [<https://swx.sinp.msu.ru/>] планируется создание системы краткосрочного прогноза солнечных протонных событий (СПС). Выполнен первый этап работы по написанию программы и расчёта по ней флюенсов рентгеновского излучения Солнца от вспышек 24 цикла солнечной активности.

Мониторинговые измерения потоков рентгеновского излучения Солнца в диапазонах длин волн от 0,5 до 4 Å и от 1 до 8 Å проводятся на ИСЗ NOAA серии GOES. Экспериментальные данные доступны в режиме практически реального времени.

В качестве источников экспериментальных данных использованы интерактивный каталог СПС 24 цикла солнечной активности на сайте ЦДОКМ НИИЯФ МГУ, а также база данных Solar Demon [<https://www.sidc.be/solardemon/>]. На сайте ЦДОКМ НИИЯФ МГУ создана система инструментов для анализа и визуализации данных и дающая доступ к информации с большого количества космических аппаратов [<https://swx.sinp.msu.ru/tools/ida.php?gcm=1>]

The screenshot displays the IDA tool interface, divided into two main panels: 'Sources' and 'Charts'.

Sources Panel:

- Stations:** A list of stations including ACE [24912], Coronas-F [26873], DSCOVR [40390], Electro L1 [37344], Electro L2 [41105], **GOES [primary]** (selected), GOES [secondary], GOES13 [29155], GOES14 [35491], GOES15 [36411], GOES16 [41866], and Lomonosov [41464].
- Instruments:** A list of instruments including Particle, Particle fluence, Particle Orbit, PCHAN [data till 2020-03-04], PCHAN Orbit, PCHAN (GOES16) [\geq 2020-03-17], GOES-16 Orbit, **X-ray** (selected), X-ray Orbit, Magnetic field, and GEOMAG Orbit.
- Channels:** A list of channels including **0.05 - 0.4 nm [W/m²]** and **0.1 - 0.8 nm [W/m²]** (both selected).

Charts Panel:

- Chart #1:** Contains Y Axis #1 with two selected channels: 0.05 - 0.4 nm (GOES primary, X-ray) [W/m²] and 0.1 - 0.8 nm (GOES primary, X-ray) [W/m²].
- Chart #2:** Is currently empty, with an option to 'Add New Chart'.

At the bottom of the interface, there are three buttons: 'Close', 'Close and Plot', and 'Clean'.

Солнечное протонное событие – одно из наиболее важных проявлений солнечной активности. СПС очень разнообразны по своим характеристикам. Условия генерации частиц на Солнце и распространение в межпланетной среде влияют на временные профили, величины и энергетические спектры потоков солнечных протонов. Каталоги СПС предоставляют однородный ряд многолетних данных для статистического подхода к исследованию различных физических закономерностей. Каталоги СПС являются также необходимым и, пожалуй, единственным инструментом для планирования и обеспечения безопасности космических миссий, так как одной из основных угроз для них является радиационное поражение от солнечных заряженных энергичных частиц.

На сайте Центра данных оперативного космического мониторинга (ЦДОКМ) НИИЯФ МГУ [<http://smdc.sinp.msu.ru>] в разделе «Космическая погода» создана страница Каталогов СПС 20-25 циклов солнечной активности [http://swx.sinp.msu.ru/apps/sep_events_cat/index.php?gcm=1&lang=en]



The screenshot shows the website 'Космическая погода' (Cosmic Weather). The main navigation bar includes '3D МАГНИТОСФЕРА', 'МОДЕЛИ', and 'О ПРОЕКТЕ'. Below this are buttons for 'Текущее состояние ОКП', 'Гелиосфера', 'Магнитосфера', and 'Прогнозы'. The main content area is titled 'Каталоги Солнечных Протонных Событий 20-25 Циклов Солнечной Активности'. It features a horizontal menu with tabs for '20TH CYCLE', '21TH CYCLE', '22TH CYCLE', '23TH CYCLE', '24TH CYCLE' (which is selected and underlined), and '25TH CYCLE'. Below the tabs, the title '24th Cycle of Solar Activity (2009-2019)' is displayed. Underneath are three links: 'Catalog of Solar Proton Events in The 24th Cycle of Solar Activity (2009 – 2019)', 'Summary Table of Solar Proton Events in the 24 Cycle of Solar Activity (2009 – 2019)', and 'World Data Centers (WDC) in Russia and Ukraine (Catalogues of the solar proton events)'. At the bottom of the page, the text 'Event Browser' is visible.

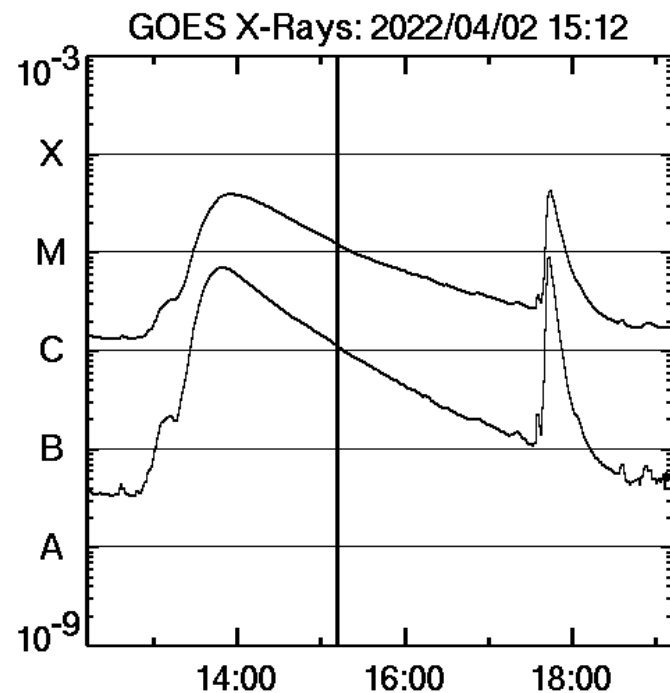
Логачев Ю.И., Базилевская Г.А., Власова Н.А., Е.И.Дайбог, Е.А.Гинзбург, В.Н.Ишков, Л.Л. Лазутин, , Нгуен М.Д., Сурова Г.М., О.С.Яковчук Каталог солнечных протонных событий 24-го цикла солнечной активности (2009-2019 гг.) Под ред. Ю.И. Логачева. М: МЦД. 2022.

Критерии выбора исследуемой характеристики

Почему выбрано излучение? Необходимо выбрать такой параметр, информацию о котором мы сможем получить и обработать до того, как частицы с наибольшими энергиями придут к Земле. Максимум потока релятивистских протонов с энергией > 1 ГэВ может быть зарегистрирован спустя 20-30 мин после момента их инжекции. Фотоны доходят от Солнца к Земле примерно за 8 минут.

Почему именно рентгеновский диапазон, а не оптический, например? Основная причина — более точная фиксация. В оптическом диапазоне даже самые мощные вспышки могут увеличить излучение лишь на доли процентов, а в области мягкого рентгеновского излучения — на несколько порядков.

Какими величинами можно описать поток излучения? По максимуму потока и по его флюенсу (интеграл по времени от плотности потока).



Временные профили величин потоков рентгеновского излучения Солнца по данным ИСЗ GOES-16 02.04.2022.

Две вспышки были примерно одинаковыми по величине максимальных потоков, но существенно различными по величинам флюенсов. СПС 02.04.2022 ассоциируется с первой вспышкой, а от второй потока солнечных протонов не зарегистрировано.

Результаты расчёта

Для расчёта флюенса потока рентгеновского излучения Солнца во время данной вспышки была создана программа на языке Python с использованием библиотек «matplotlib», «numpy» и «scipy». Реализованы два метода: «флюенс по заданному времени» и «флюенс по равному значению». Первый предусматривает точное знание времени начала и конца исследуемого возрастания потока. Для второго достаточно знать время начала вспышки, а концом считается момент, когда значение потока становится равным начальному.

№	Дата	Jmax, pfu	Класс вспышки	Локализация вспышки	Флюенс, Дж/м ²
1	2010-08-14	9,4	C4,4	N17W52	0,014
2	2010-08-18	2,2	C4,5	N18W88	0,029
3	2011-01-28	1,6	M1,3	N16W88	0,0154
4	2011-02-15	1,9	X2,2	S20W15	0,0045
5	2011-03-07	45	M3,7	S22W67	0,1906
6	2011-06-07	40	M2,5	S21W54	0,0638
7	2011-08-02	2,2	M1,4	N14W15	0,0652
8	2011-08-04	60	M9,3	N19W36	0,1147
9	2011-08-08	2,6	M3,5	N16W61	0,0336
10	2011-08-09	21,3	X6,9	N17W69	0,2841
11	2011-09-06	1,4	M5,3	N14W07	0,0794
12	2011-09-07	6	X2,1	N14W18	0,1141
13	2011-11-04	2,6	X1,9	N22E63	0,0152
14	2011-11-26	40	C1,2	N08W49	0,0003
15	2011-12-25	2,5	M4,0	S22W26	0,0241
16	2012-01-21	0,4	C2,4	N25W82	0,0027
17	2012-01-27	740	X1,7	N27W71	0,5058
18	2012-03-07	1440	X5,4	N17E27	1,3916
19	2012-03-13	390	M7,9	N19W59	0,3599
20	2012-05-17	180	M5,1	N11W76	0,1952
21	2012-07-06	23	X1,1	S13W59	0,0964
22	2012-07-08	17	M6,9	S14W83	0,0793
23	2012-07-12	80	X1,4	S14W01	0,0246
24	2012-09-01	24	C8,4	S19E42	0,0031
25	2013-04-11	100	M6,5	N09E12	0,1181
26	2013-05-13	1	X2,8	N14E85	0,4802
27	2013-05-15	20,5	X1,2	N12E64	0,2621

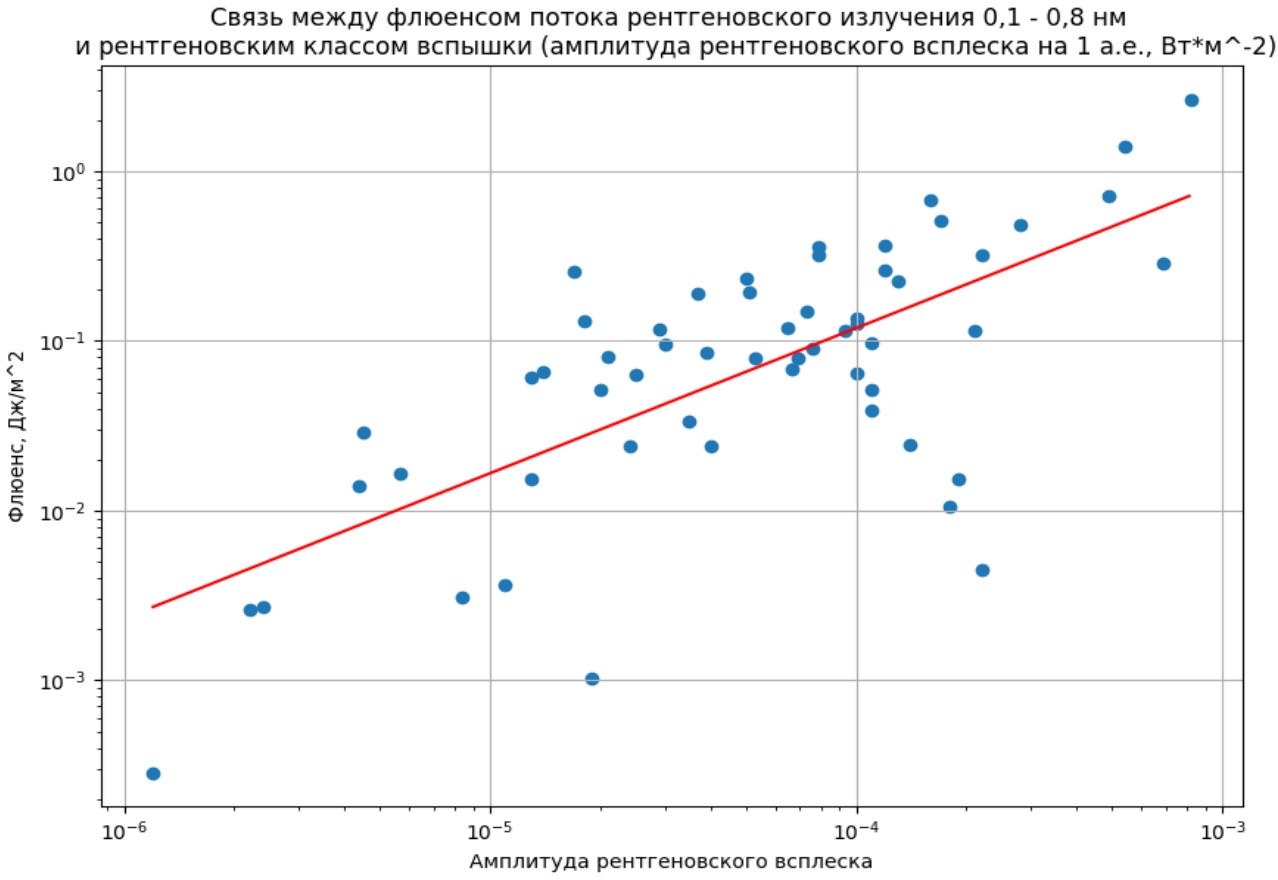
Результаты расчёта (продолжение)

№	Дата	J_{\max} , pfu	Класс вспышки	Локализация вспышки	Флюенс, Дж/м ²
28	2013-05-22	83,5	M5,0	N15W70	0,2342
29	2013-06-21	6	M2,9	S16E73	0,118
30	2013-10-28	2,3	X1,0	N04W66	0,1255
31	2013-11-07	5,5	M1,9	S11W88	0,001
32	2013-11-08	0,6	X1,1	S14E15	0,0387
33	2013-11-10	0,5	X1,1	S14W13	0,0514
34	2013-11-19	3,4	X1,0	S13W69	0,1362
35	2014-01-07	1000	X1,2	S15W11	0,3628
36	2014-02-20	17,7	M3,0	S15W73	0,0955
37	2014-02-25	13,6	X4,9	S12E82	0,7149
38	2014-02-28	97	M1,1	S24E53	0,0037
39	2014-03-29	1,4	X1,0	N11W32	0,0639
40	2014-04-18	11,8	M7,3	S20W34	0,1494
41	2014-08-25	1,3	M2,0	N05W36	0,0516
42	2014-09-10	25	X1,6	N14E02	0,6754
43	2014-12-21	2,4	X1,8	S21W24	0,0106
44	2014-12-23	5	C5,7	S19W71	0,0164
45	2015-06-18	15,4	M1,3	S16W81	0,0609
46	2015-06-25	13,5	M7,9	N09W42	0,3223
47	2015-09-20	2,2	M2,1	S20W24	0,0799
48	2015-11-09	2,7	M3,9	S11E41	0,0848
49	2015-12-28	1,4	M1,8	S23W11	0,1319
50	2016-03-16	1,1	C2,2	N12W88	0,0026
51	2016-04-18	0,3	M6,7	N12W62	0,0679
52	2016-07-23	0,4	M7,6	N02W74	0,0895
53	2017-07-14	11,2	M2,4	S06W29	0,0241
54	2017-09-04	99	M1,7	S11W16	0,2575
55	2017-09-06	39	X2,2	S07W33	0,3205
56	2017-09-07	575	X1,3	S11W49	0,2228
57	2017-09-10	850	X8,2	S08W88	2,6577

Сравнительный анализ результатов расчета по двум методам («флюенс по заданному времени» и «флюенс по равному значению») показал, что в случае, когда наблюдаются несколько СПС подряд, расчет флюенса по второму методу дает неправильный результат: значение потока может не достигнуть начального уровня из-за развития последующего события. Для расчётов был выбран метод «флюенс по заданному времени» для времени начала и времени конца из базы данных «Solar Demon».

Расчёт флюенса производился путём численного интегрирования методом прямоугольников.

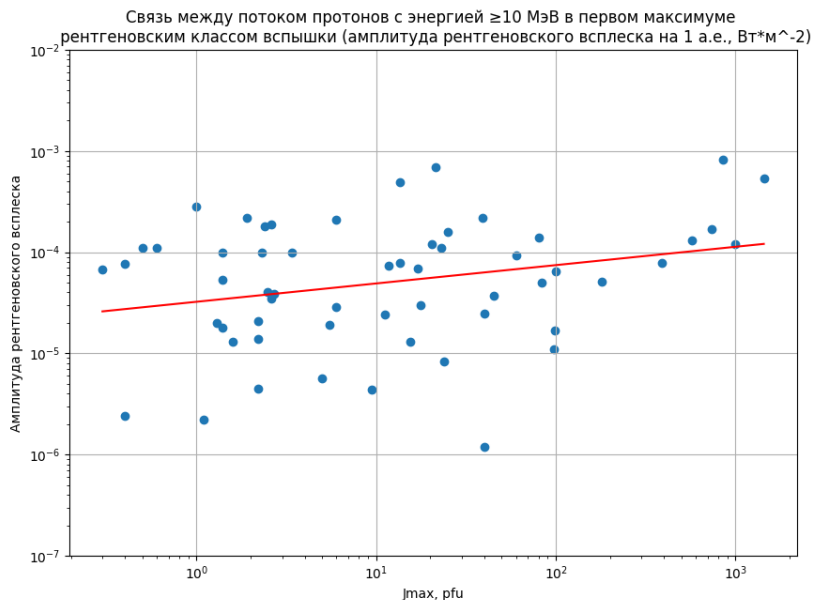
Соотношение между амплитудой и флюенсом рентгеновского излучения Солнца



Поиск степени соответствия между амплитудой и флюенсом рентгеновского излучения Солнца был произведен только для вспышек, с которыми ассоциируются СПС по Каталогу 24 цикла солнечной активности. Можно видеть, что закономерность есть, но и наблюдается разброс значений.

Результат использования метода наименьших квадратов для полученного набора значений в логарифмическом масштабе: $\log_{10}f = P\log_{10}A + Q$, где f — флюенс, A — амплитуда рентгеновского излучения, коэффициенты: $P=0,86 \pm 0,12$; $Q=2,50 \pm 0,52$. **Коэффициент корреляции: R=0,69.**

Соотношение между рентгеновским излучением во время солнечных вспышек и потоком солнечных протонов



Соотношение между **амплитудой** рентгеновского излучения Солнца и величинами **потоков** солнечных протонов с энергией >10 МэВ.

Линейная аппроксимация : $\log_{10} A = P \log_{10} J + Q$,

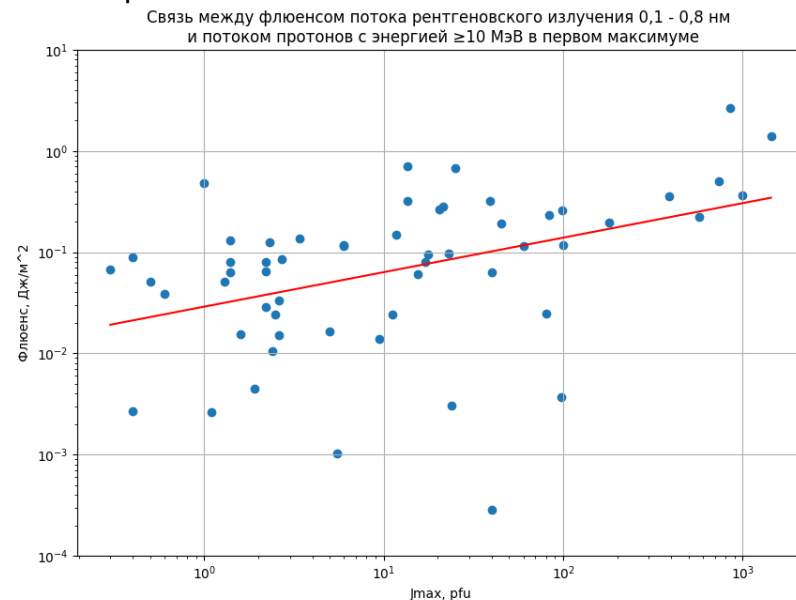
где A — амплитуда рентгеновского излучения,

J — поток протонов,

коэффициенты: $P = 0,18 \pm 0,09$; $Q = -4,49 \pm$

$0,12$. **Коэффициент корреляции: $R = 0,27$.**

Зависимости выражены довольно слабо, что может быть связано с влиянием условий в межпланетной среде при распространении энергичных частиц от Солнца до Земли. Кроме этого следует учитывать, что расчет делался для всех солнечных вспышек, расположенных на разных гелиодолготах. Но коэффициент корреляции в случае амплитуды рентгеновского излучения меньше, чем в случае флюенса. Можно предположить, что величина потока солнечных протонов более тесно связана с флюенсом рентгеновского излучения во время вспышки, чем с амплитудой.



Соотношение между **флюенсом** рентгеновского излучения Солнца и величинами **потоков** солнечных протонов с энергией >10 МэВ.

Линейная аппроксимация : $\log_{10} f = P \log_{10} J + Q$,

где f — флюенс, J — поток протонов,

коэффициенты: $P = 0,34 \pm 0,10$; $Q = -1,54 \pm 0,14$.

Коэффициент корреляции: $R = 0,42$.

Заключение

Представлены результаты исследования по поиску связи между флюенсом рентгеновского излучения Солнца во время солнечной вспышки в диапазоне длин волн 0,1–0,8 нм и солнечным протонным событием. Рассчитаны флюенсы рентгеновского излучения Солнца во время солнечных вспышек, произошедших в 24 цикле солнечной активности, с которыми ассоциируются солнечные протонные события. В качестве источников данных по параметрам солнечных вспышек и солнечных протонных событий взяты интерактивный каталог солнечных протонных событий 24 цикла солнечной активности на сайте центра данных оперативного космического мониторинга (ЦДОКМ) НИИЯФ МГУ [<https://swx.sinp.msu.ru/>] и база данных Solar Demon [<https://www.sidc.be/solardemon/>]. Получены соотношения между величинами флюенсов и максимальных потоков рентгеновского излучения Солнца и потоками солнечных энергичных протонов с энергией больше 10 МэВ по данным с ИСЗ серии GOES. Показано, что коэффициент корреляции между флюенсами рентгеновского излучения Солнца и величинами потоков солнечных протонов ($R=0,42$) больше, чем между максимальными потоками рентгеновского излучения Солнца, определяющими рентгеновский класс солнечной вспышки, и величинами потоков солнечных протонов ($R=0,27$). Разработанная методика в дальнейшем будет использована для создания системы краткосрочного прогноза солнечных протонных событий на сайте ЦДОКМ НИИЯФ МГУ.