



УДК 523.9, 523.982, 523.985

Рентгеновские вспышки Солнца в трех циклах солнечной активности (1977–2007 гг.)

Р. Т. Сотникова (RSotnikova@bk.ru)

Аннотация. По данным прямых измерений потоков рентгеновского излучения от вспышек (1–8 Å, GOES) за три цикла солнечной активности (1977–2007 гг.) рассчитаны интегральные энергии вспышек, соотносящихся с активными областями групп пятен разной классификации. Для вспышек активных областей каждого класса построены интегральные энергетические спектры и рассчитаны их показатели β . Установлено, что величина параметра β различна для активных областей каждого класса. В каждом из классов обнаружена положительная корреляция этого параметра с 11-летним циклом (числами Вольфа). Этот результат представляет интерес для прогноза средней энергии вспышек на разных фазах солнечной активности, что, в свою очередь, определяет условия космической погоды.

Ключевые слова: солнечная активность, рентгеновские вспышки, 11-летний цикл.

Введение

Солнце является основным источником энергии, поступающей на Землю в волновом и корпускулярном излучении. Все изменения в физическом режиме Солнца находят отражение в состоянии околоземного космического пространства и планеты Земля. Основной, фундаментальной задачей солнечно-земной физики является исследование на основе многолетних однородных наблюдений явлений и процессов на Солнце, распространение потока солнечного излучения в спокойных и возмущенных условиях в пространстве на участке от Солнца до Земли и воздействие этого излучения на магнитосферу, атмосферу и гидросферу. Это необходимо для обеспечения точной информацией об околоземном пространстве всех видов деятельности человека в этой среде.

Солнце является достаточно динамичным образованием. Совокупность физических явлений, сопровождаемых изменением различных параметров деятельности Солнца и фиксируемых с помощью различных средств наблюдений, называется солнечной активностью. Наиболее известным проявлением солнечной активности являются вспышки. Вспышкой принято считать проявление солнечной активности, связанное с довольно быстрым и локально сконцентрированным энерговыделением.

Внимание, которое уделяется исследованию вспышек, вызвано как теоретическим интересом к этим нестационарным образованиям в активных областях Солнца со сложной структурой магнитного поля, так и чисто прикладной стороной. Известно, что с появлением вспышек на Солнце свя-

заны многие явления в атмосфере и магнитосфере Земли. Это полярные сияния, магнитные бури, нарушение структуры земной ионосферы, приводящие к прекращению радиосвязей на коротких волнах и пр. Вспышки проявляют себя также и в околоземном пространстве. С ними связаны изменение интенсивности космических лучей, появление потока частиц разных энергий, резкое увеличение коротковолнового, рентгеновского и гамма-излучения. Излучение, сопровождающее вспышки, часто является губительным для живого организма, находящегося за пределами земной атмосферы. Вспышки влияют и на самочувствие людей, находящихся на поверхности Земли.

Начальный момент зарождения науки о солнечно-земных связях следует, по-видимому, отнести к 1843 г., когда Швабе открыл 11-летнюю цикличность в пятнообразовательной деятельности Солнца. Позднее эта цикличность была обнаружена и в частоте появления других проявлений солнечной активности, в том числе и в солнечных вспышках. Подобная цикличность была обнаружена и в явлениях в околоземном космическом пространстве, например в частотах появления полярных сияний и возмущений геомагнитного поля.

Какие проявления солнечной активности являются причиной этих возмущений, оставалось неясным до 1976 г., когда было высказано [1; 2] предположение, что полярные сияния и геомагнитные бури вызываются приходом энергичных частиц от Солнца.

В последующих исследованиях основные усилия были направлены на изучение статистических связей между явлениями на Солнце и Земле. Наибольшая информация собрана о цикличности активности Солнца и установлено, что наиболее значимыми на сегодня являются 11-летний цикл пятен и 22-летний магнитный цикл Хейла.

Одиннадцатилетний цикл Солнца синхронизирует все проявления солнечной активности – от числа пятен и напряженности магнитных полей до потока излучения в микроволновом диапазоне. Поэтому возможно, что изменение энергетических параметров солнечных вспышек в цикле является следствием 11-летнего цикла.

Постановка задачи

Оценки энергии звездных и солнечных вспышек в [3–5, 10] показывают, что распределения их интегральных по времени значений энергии могут быть представлены степенной функцией: $N(E) \sim e^{-\beta E}$, где N – число вспышек с энергией E , β – спектральный индекс.

Степенной энергетический спектр был найден для солнечных оптических вспышек [5]. Такой же характер энергетического спектра был доказан и для солнечных вспышек мягкого рентгеновского диапазона 1–8 Å [10], и обнаружена уверенная корреляция спектрального индекса β с фазой 11-летнего солнечного цикла [12; 13].

Совпадение энергетических спектров вспышек звезд и Солнца по степенной зависимости и по спектральному индексу свидетельствует об

идентичности физической природы вспышечной активности этих объектов, а изменение спектрального индекса β с фазой 11-летнего цикла Солнца может служить фундаментальной зависимостью для теории вспышек.

Однако возможно, что изменение β в цикле происходит только за счет того, что с циклом активности изменяется процентное соотношение групп пятен – основных носителей магнитного поля – разной классификации. И если β для вспышек от групп разного класса различно, то этот вариант может привести к изменению его в цикле для всего Солнца, даже если от групп пятен одного и того же класса β не изменяется на протяжении цикла. Для уточнения этого вопроса необходимо рассмотреть, как энергетический спектр вспышек связан с группами пятен разной классификации, т. е. какой вид будут иметь интегральные энергетические спектры для вспышек разных активных областей и будет ли их спектральный индекс β изменяться в цикле.

Цель настоящей статьи – определить показатель спектра β для вспышек от активных областей разных классов и исследовать его поведение в циклах отдельно для вспышек от разных групп.

Анализ и обработка данных

В работе использовалась цюрихская модифицированная классификация групп солнечных пятен (McIntosh). Эта классификация основана на визуально наблюдаемом развитии группы и является эволюционной. Она состоит из семи классов: A, B, C, D, E, F, H. Каждый класс отражает определенную стадию развития группы. Так, например, группы, относящиеся к классам A, B, C, – это развивающиеся группы, а группы классов E, F – распадающиеся. Большие группы при своем развитии и распаде проходят все указанные стадии. Группы средних размеров не проходят через стадии E–F. Наиболее полная картина развития активной области представлена в [9].

В данных Solar Geophysical Data [11] имеются ежедневные характеристики активных областей – групп солнечных пятен. В том числе для каждой активной области указан ее класс в соответствии с цюрихской модифицированной классификацией групп пятен. Известно, что группа пятен может существовать в течение нескольких дней и в процессе своей эволюции может иметь разные классы. Для каждой активной области на протяжении всего периода ее существования указывается ее McIntosh-класс в каждый день наблюдений.

Используемые в настоящей работе данные прямых измерений потоков мягкого рентгеновского излучения солнечных вспышек 1–8 Å получены с комплекса спутников GOES в течение 1977–2007 гг. По длительности этот период соответствует трем циклам солнечной активности. В данных указаны дата вспышки, время ее начала, максимальной стадии развития (максимальной интенсивности) и время конца, координаты положения вспышки на Солнце, ее рентгеновский класс и номер активной области, над которой или в окрестностях которой вспышка проявилась. Для каждой активной области указывается ее класс в каждый день наблюдений на протяжении всего периода ее существования.

На первом этапе выполнено сопоставление каждой рентгеновской вспышки с соответствующей ей активной областью и создана база данных по рентгеновским вспышкам, соотносящимся с группами пятен разной классификации [7; 8].

Работа над составлением базы включала следующие предварительные этапы:

- выполнение сопоставления каждой рентгеновской вспышки с соответствующей ей активной областью – McIntosh-класс;
- расчет для каждой вспышки ее длительности, времени роста и времени спада;
- расчет для каждой вспышки интегральной энергии и инергии, выделенной на фазе роста и фазе спада;
- оформление результатов в виде электронных таблиц для каждого года на протяжении трех циклов солнечной активности.

Автором была выполнена компиляция данных GOES в электронный каталог рентгеновских вспышек, который содержит единую базу данных (БД) за три цикла солнечной активности. В настоящее время БД содержит полное число вспышек – 62 480, и электронный каталог рентгеновских вспышек охватывает период времени с 1977 по 2007 г. В зависимости от вида содержащейся информации, данные в базе расположены в структурных разделах и могут пополняться.

Затем были вычислены полные энергии каждой рентгеновской вспышки по дням наблюдений и построены интегральные энергетические спектры (ИЭС) вспышек за три цикла солнечной активности. Интегральный энергетический спектр солнечных вспышек 1–8 Å, построенный по наблюдениям 21 527 вспышек в пределах всего 23-го цикла активности, показан на рис. 1. В логарифмических осях построена зависимость полного числа вспышек N с энергией $E \geq E_{\max}$ от величины E_{\max} . Эта зависимость идентична тем, которые получаются для вспышек на звездах. В двойных логарифмических координатах в области средних и высоких значений энергии для всех спектров соблюдается линейная зависимость вида

$$\lg E = \lg E_{\max} - \left(\frac{1}{\beta}\right) \lg N,$$

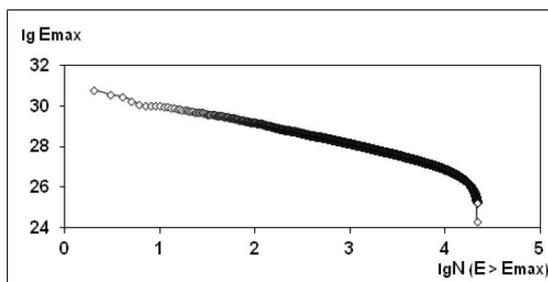


Рис. 1. Интегральный энергетический спектр всех вспышек 1–8 Å в 23-м цикле солнечной активности

Обработка данных выполнена по методике [10, 12]. Для 21-го и 22-го циклов активности соответственно $\beta = 0,604 \pm 0,016$ и $\beta = 0,559 \pm 0,017$, что находится в хорошем согласии с общей картиной звездных энергетических спектров – активных красных карликов [3], показатель спектра которых заключен в интервале от 0,443 до 1,412.

Заметно, что имеется различие численных значений спектральных индексов для четного 22-го цикла и нечетных 21-го и 23-го циклов, а именно: β в 22-м цикле меньше, чем β в 21-м и 23-м циклах.

На первом этапе исследований задача была поставлена так – рассмотреть поведение β только в двух случаях: мощных группах, класса E-F, сгруппированных вместе, и более слабых группах A-B-C, также объединенных в общую базу данных. Число вспышек в этих группах разное, но как ведет себя β : будет ли различаться показатель спектра для этих групп и как он будет вести себя в цикле? Как видно на рис. 2, изменение спектрального индекса в цикле присутствует как для мощных групп E-F, так и для групп A-B-C: β показывает положительную корреляцию с фазой цикла, т. е. с числами пятен. Также на графике заметно различие показателей спектра для этих двух типов активных областей.

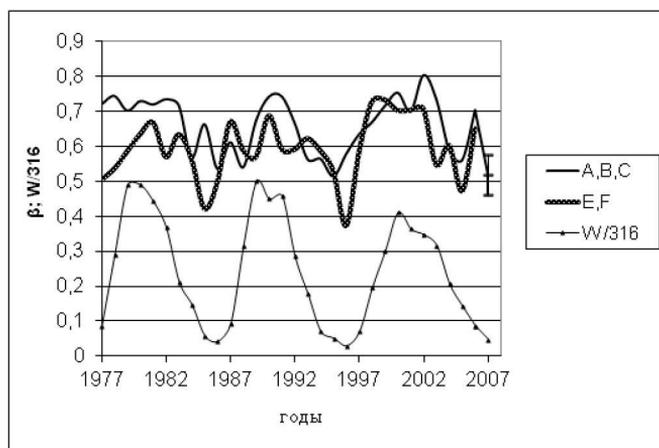


Рис. 2. Изменение показателя β энергетического спектра рентгеновских вспышек активных областей A-B-C и E-F в трех циклах солнечной активности (W – числа Вольфа).

Вверху справа показан доверительный интервал на уровне значимости 0, 95

Для уточнения последнего результата были получены значения β , рассчитанные по суммарному числу вспышек в каждом из циклов. Результаты показаны в табл. 1 и подтверждают различие степенного индекса для рассматриваемых типов активных областей. Кроме того, присутствует различие между спектральными индексами четного 22-го и нечетных 21-го и 23-го циклов, что характерно для 22-летнего магнитного цикла солнечной активности.

Таблица 1

Численные значения спектрального индекса β в трех циклах

	A-B-C	E-F	D
21 цикл	0,683±0,039	0,607±0,023	0,60±0,030
22 цикл	0,608±0,040	0,580±0,026	0,58±0,032
23 цикл	0,660±0,040	0,625±0,023	0,63±0,027

На следующем этапе, для повышения надежности замеченной 22-летней модуляции, показатель спектра считался как среднециклический, т. е. в пределах каждого 11-летнего цикла был взят сплошной ряд данных от первого года (и месяца) данного цикла до последнего года (и месяца) в этом цикле. Такой счет выполнен отдельно для вспышек активных областей классов А, В, С, D, H и (объединенных вместе) классов E-F для каждого из трех циклов: 21-го, 22-го и 23-го. Полученные результаты показаны на рис. 3.

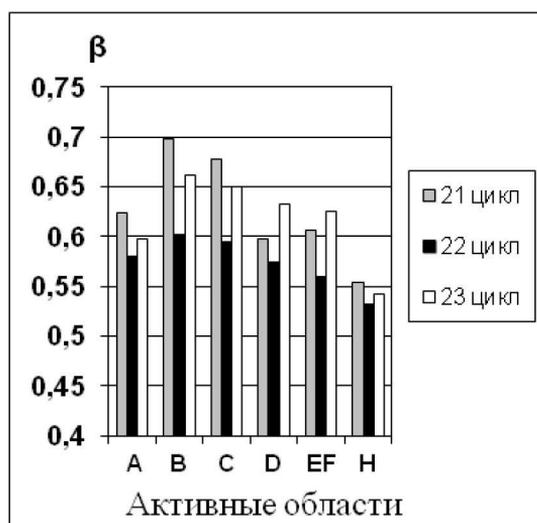


Рис. 3. Распределение показателя спектра вспышек в трех циклах солнечной активности для групп, находящихся в разной стадии эволюции. Присутствует 22-летняя модуляция. Численные значения спектрального индекса β в трех циклах

Заметно, что значения β отличаются для групп пятен, находящихся на разных стадиях своей эволюции. На разных этапах развития активной области структура и динамика магнитного поля в ней значительно меняется [6], что, вероятно, должно отражаться на мощности происходящих в ней вспышек. Возможно, что полученные результаты являются аргументами в пользу этой гипотезы.

На рис. 3 видно, что распределение β в трех циклах для вспышек каждого класса групп пятен устойчиво сохраняет присутствие 22-летней мо-

дуляции. Кроме того, по данным, полученным за три цикла солнечной активности, можно отметить различие между средними за цикл индексами четного 22-го и нечетных 21-го и 23-го циклов для всех групп, что характерно для 22-летнего цикла. С точки зрения статистики этот результат требует уточнений, которые могут быть получены по дополнительным данным настоящего 24-го цикла или проверены на независимых исследованиях, например продуктивности активных областей в нескольких 11-летних циклах.

Заключение

Установлено, что показатель спектра для вспышек каждого McIntosh-класса уверенно варьирует с фазой цикла. Этот результат говорит о том, что данные вариации не являются следствием перераспределения в цикле мощных и слабых вспышек, а отражают внутреннюю причину цикличности в активности Солнца.

Спектральный индекс для всех активных областей обнаруживает заметную 22-летнюю модуляцию. Присутствие ее как в спектрах, построенных для отдельных активных областей, так и в спектрах, построенных из событий во всех активных регионах, предполагает существование глобального механизма вспышечной активности. Возможно, что теория вспышек должна учитывать не только магнитные поля в области самой группы, но и общее магнитное поле Солнца.

Полученные результаты подтверждают тесную связь вспышечной активности с магнитными полями Солнца разных масштабов и следовательно подтверждают концепцию магнитной природы солнечной активности, определяют фундаментальную роль магнитных полей и, соответственно, ставят задачу поиска механизма взаимодействия этих полей и перехода их энергии в энергию активных процессов на Солнце.

Выводы относятся к трем циклам солнечной активности и представляют интерес как для теории вспышек, так и для их прогнозирования. Разработка методов прогноза различных проявлений солнечной активности, а также связанных с явлениями на Солнце геомагнитных бурь – одна из ключевых задач, стоящих перед исследователями Солнца и солнечно-земных связей.

Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программой «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы по Соглашению от 24.08.2012 № 8407 между Минобразования и науки и ИСЗФ СО РАН.

Список литературы

1. *Акасофу С. И.* Солнечно-земная физика. В 2 т. Т. 1 / С. И. Акасофу, С. С. Чепмен. – М. : Мир, 1975. – 384 с.
2. *Акасофу С. И.* Солнечно-земная физика. В 2 т. Т. 2 / С. И. Акасофу, С. С. Чепмен. – М. : Мир, 1975. – 512 с.
3. *Гершберг Р. Е.* Активность солнечного типа звезд главной последовательности / Р. Е. Гершберг. – Одесса : Астропринт, 2002. – 688 с.

4. Кацова М. М. Активность звезд поздних спектральных классов / М. М. Кацова, М. А. Лившиц // АЖ. – 2006. – Т. 73. – С. 649–658.
5. Курочка Л. Н. Распределение энергии 15 тысяч солнечных вспышек / Л. Н. Курочка // АЖ. – 1987. – Т. 64, № 2. – С. 443–446.
6. Милецкий Е. В. Временные вариации среднегодовых значений напряженности магнитных полей солнечных пятен / Е. В. Милецкий, Ю. А. Наговицын // Тр. конф. «Солнце в эпоху смены знака магнитного поля». – СПб., 2001. – С. 281–283.
7. Сотникова Р. Т. Свидетельство о государственной регистрации базы данных / Р. Т. Сотникова, Е. С. Исаева, В. И. Красов, М. П. Сотников // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2012620690. Зарегистрировано 20 июля 2012 г.
8. Сотникова Р. Т. Единая база данных параметров рентгеновских вспышек, соотносящихся с группами пятен разных классов, в трех циклах солнечной активности / Р. Т. Сотникова // Солнечно-земная физика. – 2013. – Вып. 23. – С. 33–36.
9. Степанян Н. Н. Наблюдаем Солнце / Н. Н. Степанян. – М.: Наука, 1992. – 128 с.
10. Kasinsky V. V. Variation of the Solar flare energy spectrum over the 11-year activity cycle / V. V. Kasinsky, R. T. Sotnicova // Proceedings of the Colloquium No. 104 IAU, Stanford, USA, August 15–19, 1988. – Poster Papers. – P. 255–258.
11. PRAF of Solar Geophysical Data, (1972–2008). NOAA-USAF Space Environment Center, US Depart. of commerce, Boulder, Colorado.
12. Sotnikova R. T. Energy Spectrum of X-Ray Flares Associated with Sunspot Groups of Different Classes in Three Solar Cycles / R. T. Sotnikova // Geomagnetism and Aeronomy. – 2010. – Vol. 50, N 7. – P. 905–907.
13. Sotnikova R. X-ray Solar flares in two Cycles of solar activity / ASP Conference Series, 2001. – Vol. 234, CD-ROM. (Proc., of conference held in Mondello (Palermo), Italy 4–9 September, 2000).

X-Ray Solar flares in the three solar activity cycles (1977–2007)

R. T. Sotnikova

Annotation. Data from direct measurements of X-ray fluxes from flares (1–8 Å, GOES) for three solar cycles (1977–2007) were used to calculate integral energies of flares associated with active regions of spot groups of different class. For the flares in active regions of each class we constructed integral energy spectra and calculated their indices β . It was found that the β parameter value differed for active regions of different class. In each class, we revealed a positive correlation between this parameter and 11-year cycle (Wolf number). This result is interest in forecasting the mean flare energy in different phases of solar activity that, in turn, determines the space weather conditions.

Key words: solar activity; X-ray flares; 11-year cycle.

Сотникова Раиса Тимофеевна
кандидат физико-математических наук
Иркутский государственный университет
664003, Иркутск, ул. К. Маркса, 1
доцент
тел. 8-(3952)-24-21-84

Sotnikova Raisa Timofeevna
Ph. D. in Physics and Mathematics
Irkutsk State University
1, K. Marx str., Irkutsk, 664003
Assistant Professor
tel.: 8-(3952)-24-21-84