



Серия «Науки о Земле»
2015. Т. 12. С. 115–123
Онлайн-доступ к журналу:
<http://isu.ru/izvestia>

ИЗВЕСТИЯ
*Иркутского
государственного
университета*

УДК 523.9, 523.982, 523.985.

Частота рентгеновских вспышек Солнца в группах пятен, находящихся на разной стадии эволюции (McIntosh), в трех циклах активности (1977–2007 гг.)

Р. Т. Сотникова (RSotnikova@bk.ru)

Аннотация. Солнечная активность определяет состояние межпланетного космического пространства и является управляющим фактором космической погоды. Влияние факторов космической погоды на геосферу показывает практическое значение исследований в этой области. Наиболее мощные проявления солнечной активности, которые часто становятся причиной геоэффективных событий, – это *солнечные вспышки*. В работе исследуется продуктивность рентгеновских вспышек в группах солнечных пятен, находящихся на разной стадии эволюции. Показано, что в 1977–2007 гг. продуктивность вспышек для всех групп пятен не следует ходу чисел Вольфа: она растет на спаде и находится в обратной зависимости с 11-летним циклом, т. е. обнаруживает циклический характер с максимумами в эпоху минимума 11-летнего цикла. Присутствует 22-летняя модуляция продуктивности вспышечной активности в мягком рентгеновском диапазоне.

Полученные результаты могут быть использованы для прогноза уровня ионизирующей рентгеновской радиации Солнца в различные эпохи 11-летнего цикла, которая в немалой степени определяет условия космической погоды и влияет на теносферу и биосферу Земли.

Ключевые слова: солнечная активность, рентгеновские вспышки, 11-летний цикл, 22-летний цикл, космическая погода.

Введение

Влияние Солнца на Землю многогранно. Прежде всего, Земля непрерывно получает от Солнца почти постоянный поток энергии, обеспечивающий достаточные уровень освещённости и температуру её поверхности и воздуха. Это создает необходимые условия для существования флоры и фауны, для жизни людей. В то же время Земля подвергается разнообразным воздействиям, источником которых являются нестационарные солнечные процессы, такие как вспышки, корональные выбросы массы и другие проявления солнечной активности. Большая часть этих воздействий оказывает негативное влияние на биосферу и техносферу. Сегодня не вызывает сомнения присутствие влияния нестационарных солнечных процессов на природу Земли, различные стороны жизнедеятельности человека, а также на технику и некоторые технологические процессы.

Прежде всего речь идет о солнечных вспышках и корональных выбросах массы. Солнечные вспышки – источники повышенных потоков электромагнитного излучения в широком спектральном диапазоне, включая ультрафиолетовый участок (УФ) спектра, рентгеновский диапазон и даже гамма-излучение. Кроме этого, солнечные вспышки бывают источниками солнечных космических лучей – высокоэнергичных заряженных частиц, прежде всего протонов. К чему приводит воздействие этих факторов на околоземное космическое пространство и на Землю? Воздействие это достаточно разнообразно. Электромагнитное излучение вспышки в УФ- и рентгеновском диапазонах вызывает дополнительную ионизацию верхних слоев ионосферы, что приводит к кратковременному ухудшению или даже полному прекращению радиосвязи на освещенной стороне Земли. Ускоренные во вспышке высокоэнергичные частицы, вторгаясь в нижнюю ионосферу и стратосферу полярных широт, вызывают длительное ухудшение коротковолновой радиосвязи. Потоки солнечных космических лучей от мощных вспышек представляют собой один из главных источников радиационной опасности для экипажей и систем навигации космических аппаратов.

Явления, связанные с солнечной активностью, приводят к значительным возмущениям магнитного поля Земли, что становится причиной геомагнитных бурь. Геомагнитные бури являются одним из важнейших элементов космической погоды и влияют на многие области деятельности человека, из которых можно выделить возникновение вихревых индукционных токов в трансформаторах и трубопроводах и даже разрушение энергетических систем. Магнитные бури также влияют на здоровье и самочувствие людей.

Земная атмосфера поглощает коротковолновую область спектра солнечного электромагнитного излучения, где находятся ультрафиолетовые, рентгеновские и гамма-лучи. Все они, кроме близкого ультрафиолета, доступны наблюдениям только с ракет и искусственных спутников, оснащенных специальной аппаратурой. Поэтому рентгеновская астрономия начала интенсивно развиваться сразу же с появлением внеатмосферных методов, когда были созданы мощные ракеты и большие космические станции, способные нести на борту достаточно сложные и высокотехнологичные телескопы, имеющие высокое пространственное и спектральное разрешение.

Современные представления о структуре верхней атмосферы Солнца базируются на определяющей роли локальных магнитных полей, но исследования некоторых звезд и их магнитной активности показали, что связь между вспышечной активностью звезды и ее магнитным полем не является однозначной. В этой связи достаточно актуальной представляется задача определения параметров рентгеновских вспышек Солнца, соотносящихся с группами пятен разных классов, на протяжении нескольких циклов солнечной активности, и исследование возможного влияния на процесс образования вспышек глобальных характеристик Солнца, например общего магнитного поля.

Физический смысл понятия группы солнечных пятен состоит в том, что все ее составляющие принадлежат к одной и той же системе магнитного поля, причем сами пятна являются как бы местами закрепления петель силовых линий, идущих от пятна к пятну.

Для классификации групп пятен было предложено несколько схем. Наиболее используемые – две: цюрихская модифицированная классификация групп солнечных пятен (McIntosh) и маунт-вилсоновская магнитная. Цюрихская классификация групп основана на визуально наблюдаемом развитии группы и является эволюционной. Она состоит из семи классов: А, В, С, D, E, F, H. Каждый класс отражает определенную стадию развития группы. Так, например, группы, относящиеся к классам А, В, С, – 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 на рис. 1 [7].

В качестве меры солнечной активности предложено несколько индексов, но наиболее значимыми на сегодня являются 11-летний цикл пятен и 22-летний магнитный.

Постановка задачи

В работах автора [6; 8–10] исследовалась энергетика вспышек и их связь с группами пятен разной классификации (McIntosh). Все расчеты были получены на основе единой базы данных [2; 3] параметров рентгеновских вспышек и групп пятен цюрихской модифицированной классификации за три цикла солнечной активности. Было установлено, что численные значения показателя энергетического спектра β различны для активных областей развивающихся групп классов $A - B - C$, распадающихся групп $E - F$ и находящихся в максимуме эволюции групп класса D . При этом β обнаруживал изменение с фазой цикла как для вспышек мощных активных областей, так и более слабых, показывая положительную корреляцию с числами Вольфа. Кроме того, спектральный индекс проявлял заметную 22-летнюю модуляцию.

В последующих работах [4; 5; 12] эти исследования были расширены и выполнены для групп развивающихся активных областей отдельно для каждого класса A, B, C . Результаты исследований, как и в предыдущих работах, подтвердили вариации показателя интегрального энергетического спектра вспышек каждой из активных областей с 11-летним циклом солнечной активности, а также присутствие и 22-летней модуляции.

С точки зрения статистики, результат 22-летней модуляции требует уточнений, которые могут быть получены в будущем по дополнительным данным 24-го цикла или проверены на независимых исследованиях, например продуктивности активных областей в нескольких 11-летних циклах.

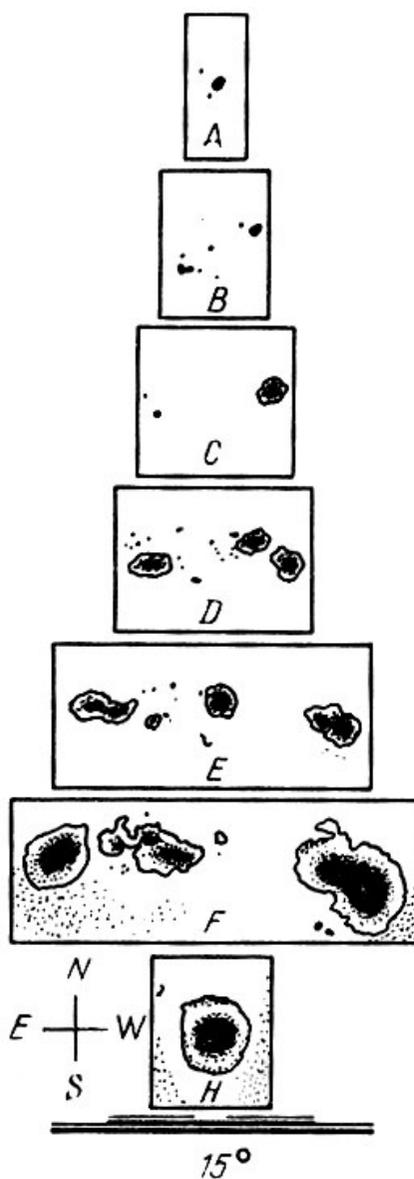


Рис. 1. Цюрихская модифицированная классификация групп пятен

Цель настоящей статьи – оценить продуктивность рентгеновских вспышек, соотносящихся с группами солнечных пятен разной классификации на протяжении трех циклов солнечной активности (1977–2007 гг.). Для этого рассмотреть, все ли группы дают вспышки, различна ли продуктивность группы на разной стадии своей эволюции и изменяется ли продуктивность вспышек в цикле групп.

Исходные данные и результаты анализа

В работе использовалась цюрихская модифицированная классификация групп солнечных пятен (McIntosh). Наиболее полная картина развития активной области представлена в [1; 7].

В данных Solar Geophysical Data [9] 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 [9] в течение 1977–2007 гг. По длительности этот период соответствует трем циклам солнечной активности.

Предварительно было выполнено сопоставление каждой рентгеновской вспышки с соответствующей ей активной областью. Затем создана база данных по рентгеновским вспышкам, соотносящимся с группами пятен разной классификации [3; 7].

Работа над составлением базы включала следующие предварительные этапы:

- выполнение координатного сопоставления каждой рентгеновской вспышки с соответствующей ей активной областью McIntosh-класса;
- подсчет ежегодного суммарного числа групп пятен N_{gp} каждого класса;
- подсчет ежегодного суммарного числа вспышек $N_{всп.}$, соотносящихся с группой пятен каждого класса;
- оценка среднего числа вспышек на данную группу $N_{всп.} / N_{gp}$ в каждом году;
- 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 за три цикла солнечной активности. В настоящее время база данных 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.

В таблице приведены средние значения продуктивности вспышек в группах каждого класса, рассчитанные по всему массиву данных за 1977–2007 гг., и показан доверительный интервал на уровне значимости 0,95.

Таблица

Численные значения продуктивности вспышек для разных активных областей

A	B	C	D	E	F	H
1,45±0,004	1,68±0,005	3,19±0,013	6,09±0,03	10,41±0,047	14±0,104	1,96±0,011

Видно, что значения продуктивности отличаются для групп пятен, находящихся на разных стадиях своей эволюции. При этом и самые слабые группы класса *A* дают вспышки, число которых в течение трех циклов активности меняется незначительно – одна-две вспышки на группу. Продуктивность вспышек на одну группу пятен, оцененная как среднее значение за весь период, имеет определенное значение для каждой группы и заметно нарастает при переходе от слабо развитых групп класса *A* к более мощным группам классов *E*, *F*, т. е. чем мощнее группа, тем чаще вспышки. Так, для групп класса *B* интервал вспышечной активности составляет 1–2 вспышки в группе, и крайне редко бывает 3 вспышки. Для *C*-групп – от двух до пяти вспышек, для *D* – 3–8 вспышек, а для *E* и *F* соответственно 5–20 или 9–30 вспышек.

На разных этапах развития активной области структура и динамика магнитного поля в ней значительно меняется [1], что, вероятно, должно отражаться на мощностях происходящих в ней вспышек. Возможно, что полученные результаты являются аргументами в пользу этой гипотезы.

Для оценки вариаций частоты вспышечного процесса в цикле рассчитывалась годовая продуктивность каждой группы как отношение числа вспышек к числу групп за данный год. Результаты расчетов показаны в виде гистограмм среднегодового распределения продуктивности вспышек за три периода активности (рис. 2). На графиках показана кривая чисел Вольфа *W*.

На гистограммах хорошо заметно, что продуктивность вспышек (для всех классов групп пятен) не следует ходу чисел Вольфа: она растет на фазе спада и находится в обратной зависимости с 11-летним циклом. Такая картина проявляется более заметно с усложнением группы пятен от класса *A* к *B* и *C*, а начиная с класса *D* проявляется 22-летняя модуляция, которая наиболее различима для активных областей класса *H*.

С учетом данных результатов и в предположении, что у вспышек проявляется свой цикл, который начинается на ветви спада цикла Вольфа, были сделаны оценки продуктивности только для ветви спада пятенного цикла. Расчеты выполнены для интервалов 1982–1987 гг., 1992–1997 гг. и 2002–2007 гг. и представлены на рис. 3, который уверенно показывает присутствие 22-летней модуляции для продуктивности вспышек, соотносящихся со всеми классами групп солнечных пятен.

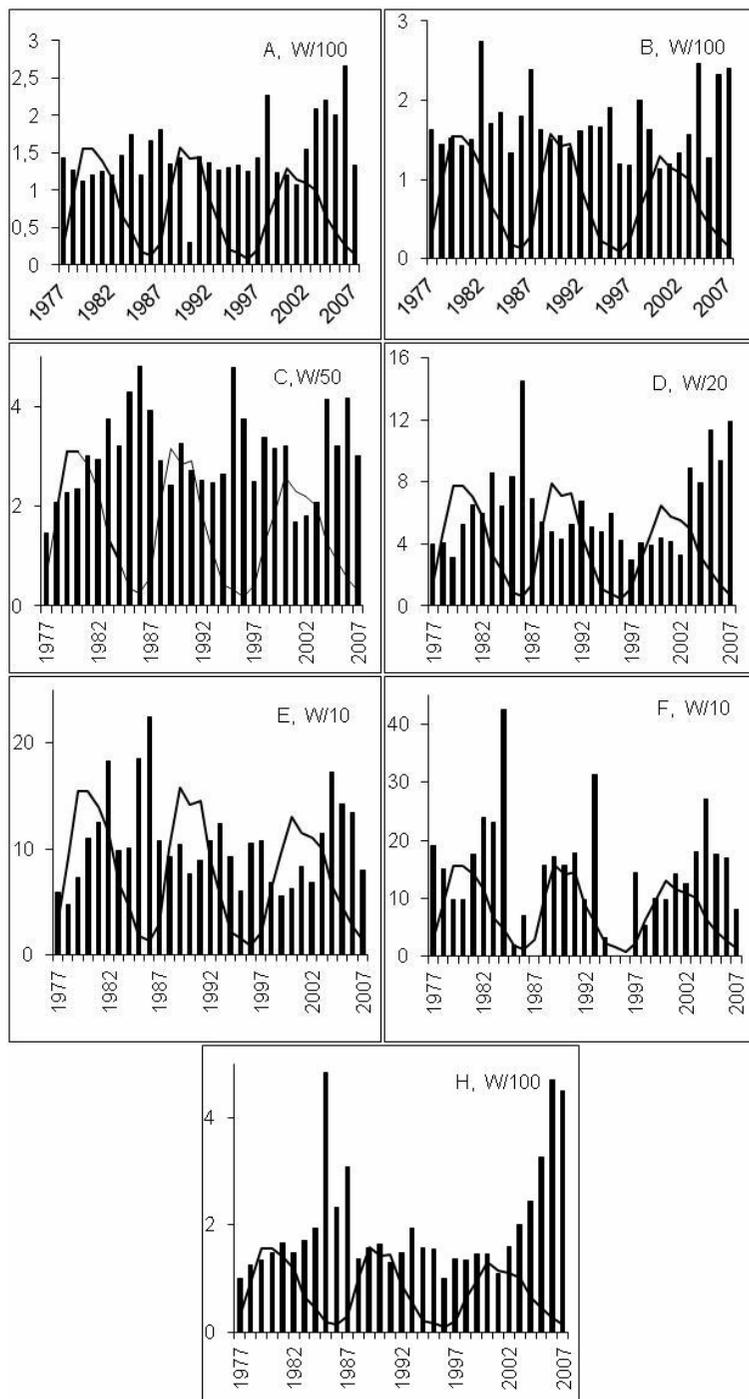


Рис. 2. Среднегодовые продуктивности вспышек групп солнечных пятен, находящихся в разной стадии эволюции

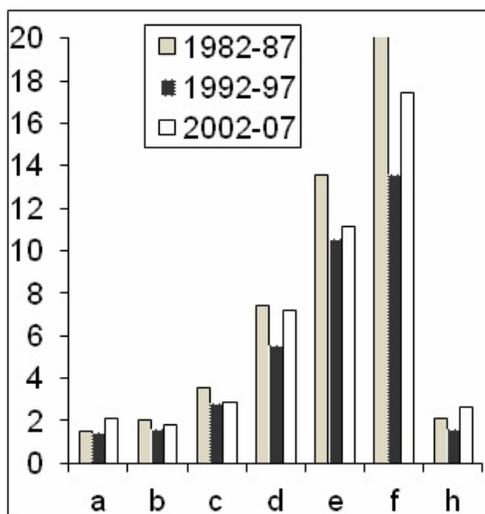


Рис. 3. 22-летняя модуляция продуктивности рентгеновских вспышек

Заключение

Результаты выполненных исследований позволяют сделать следующие выводы.

Значения вспышечной продуктивности различны для групп пятен, находящихся на разных стадиях своей эволюции, и возрастают с усложнением группы, т. е. чем мощнее группа, тем выше ее продуктивность.

Показано, что в период 1977–2007 гг. продуктивность вспышек для всех групп пятен (McIntosh) не следует ходу чисел Вольфа: она растет на спаде и находится в обратной зависимости с 11-летним циклом, т. е. обнаруживает циклический характер с максимумами в эпоху минимума 11-летнего цикла активности Солнца.

Оценки продуктивности только для ветви спада пятенного цикла уверенно показывают присутствие 22-летней модуляции в продуктивности вспышек, соотносящихся со всеми классами групп солнечных пятен.

Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития ИГУ (2014–2016 гг.) и Федеральной целевой программой «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

Список литературы

1. Милецкий Е. В. Временные вариации среднегодовых значений напряженности магнитных полей солнечных пятен / Е. В. Милецкий, Ю. А. Наговицын // Солнце в эпоху смены знака магнитного поля : тр. конф. – СПб., 2001. – С. 281–283.
2. 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.
3. 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

4. Сотникова Р. Т. Рентгеновские вспышки Солнца в трех циклах солнечной активности (1997–2007) / Р. Т. Сотникова // Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. Науки о Земле. – 2013. – Т. 6, № 2. – С. 157–164.
5. Сотникова Р. Т. Энергетические спектры рентгеновских вспышек для разных активных областей / Р. Т. Сотникова // Солнечно-земная физика. – 2013. – Вып. 23. – С. 33–36
6. Сотникова Р. Т. Энергетический спектр рентгеновских вспышек, соотносящихся с группами пятен разных классов, в трех циклах солнечной активности / Р. Т. Сотникова // Солнечно-земная физика. – 2009. – Вып. 13. – С. 72–74
7. Степанян Н. Н. Наблюдаем Солнце / Н. Н. Степанян. – М. : Наука, 1992. – 128 с.
8. Kasinsky V. V. Integral energy spectra of solar soft X-ray flares in the tree solar activity cycles (1972–2001) / V. V. Kasinsky, R. T. Sotnikova // Astronomical and Astrophysical Transactions. – 2003. – Vol. 22, N 3. – P. 325–333.
9. Kasinsky V. V. Solar flare energy spectrum over the 11-year cycle, and the similarity between solar and stellar flares / V. V. Kasinsky, R. T. Sotnikova // Astronomical and Astrophysical Transactions. – 1997. – Vol. 12. – P. 313–314.
10. Kasinsky V. V. Variations the solar flare energy spectrum over two activity cycles (1972–1995) / V. V. Kasinsky, R. T. Sotnikova // Journal of the Korean Astronomical Society. – 1996. – Vol. 29. – P. 315–316.
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.

Productivity of X-ray Flares in Sunspot Groups at Different Stages of Evolution (McIntosh) During Three Solar Cycles (1977–2007)

R. T. Sotnikova

Abstract. Productivity of X-ray flares in sunspot groups at different stages of evolution is studied. As shown, the flare productivity for all sunspot groups (McIntosh) in 1977–2007 does not correlate with Wolf number course: it increases at the activity decay and shows the inverse relationship with 11-year cycle that is, it demonstrates a cyclic behavior with maxima during the minimum phase of 11-year cycle.

In soft X-ray range, 22-year modulation of flare activity productivity occurs. This result is interest in forecasting the mean flare energy in different phases of solar activity that, in turn, determines the space weather conditions.

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

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

Sotnikova Raisa Timofeevna
Candidate of Sciences (Physics and
Mathematics), Associate Professor
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003
tel.: 8(3952)24-21-84