

СОЛНЦЕ В РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧАХ

Р. Т. СОТНИКОВА

Иркутский государственный университет

THE SUN IN X-RAYS

R. T. SOTNIKOVA

The newest results on the long-term solar X-ray observations are presented. The statistical characteristics of solar flares are shown to correlate with the phase of the solar activity cycle. Parallels are discussed between the flare activity of the Sun and red dwarfs of the UV Cet type. It is emphasized that the relation between the flare activity of the star and its magnetic field is ambiguous.

Изложены новейшие результаты долговременных наблюдений Солнца в рентгеновских лучах. Показано, что статистические характеристики солнечных вспышек коррелируют с фазой цикла солнечной активности. Обсуждена аналогия между вспышечной активностью Солнца и красных карликовых звезд типа UV Кита. Подчеркнуто, что связь между вспышечной активностью звезды и ее магнитным полем не является однозначной.

Солнце интенсивно изучается в астрономии не только потому, что оно господствует в Солнечной системе, но и как единственная звезда, достаточно близкая к нам для детального изучения ее поверхности, атмосферы и активности. Физика Солнца лежит в основе как астрономии Солнечной системы, так и всей физики звезд в целом. Большую часть рассуждений, приведенных для Солнца, можно применить с некоторыми изменениями к множеству звезд из его окрестностей, но при этом на Солнце мы можем видеть и изучать явления, присутствие которых на других звездах лишь предполагается.

СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ

При визуальных наблюдениях солнечные вспышки обнаруживаются как быстрые повышения яркости небольших (малые доли процента солнечного диска) участков поверхностных слоев Солнца. После быстрого возгорания обычно наступает сравнимая по длительности фаза максимального свечения вспышки, которую плавно сменяет в несколько раз более продолжительная стадия затухания. Типичная вспышка длится около часа, но самые быстрые успевают вспыхнуть и погаснуть за минуты, а самые долгоживущие длятся несколько часов.

Вспышки, как правило, возникают в активных областях и являются самыми мощными и бурными процессами в атмосфере Солнца. Во время вспышек взрывоподобным образом выделяется огромное количество энергии в видимой части спектра, ультрафиолетовых, рентгеновских и γ -лучах. Наряду с различными видами электромагнитного излучения значительная доля энергии солнечных вспышек передается ускоренным частицам — солнечным космическим лучам. Со вспышками связаны выбросы холодной материи и передвижения больших масс вещества. Мощные вспышки захватывают практически все слои атмосферы Солнца от короны до фотосферы.

Вспышки появляются в областях со сложной структурой магнитного поля, которое, вероятно, играет определяющую роль в их возникновении. Во время мощных вспышек быстрые процессы охватывают ог-

ромное пространство от хромосферы до короны и межпланетной среды. В общей энергетике вспышек вклад радиоизлучения минимален, излучения в оптическом и рентгеновском диапазонах сравнимы по порядку величины, а кинетическая энергия охваченного вспышкой вещества, вероятно, на порядок величины превосходит энергию электромагнитного излучения. Общепринято допускать, что непосредственная причина вспышек лежит в структурных изменениях локальных магнитных полей, однако полная теория таких процессов пока еще не построена. Это вызывает появление альтернативных точек зрения на явление вспышки и проблему в целом. Объяснение всего многообразия процессов, происходящих во время вспышек, выяснение механизмов, приводящих к быстрому выделению огромного количества энергии (10^{28} – 10^{32} эрг), являются важнейшими задачами современной астрофизики.

Кроме большого теоретического интереса изучение вспышек имеет важное прикладное значение. Известно, что с появлением вспышек на Солнце связаны многие явления в атмосфере и магнитосфере Земли (полярные сияния, магнитные бури, прекращение радиосвязи на коротких волнах, нарушение работы радионавигационных устройств и пр.). Имеются данные, свидетельствующие о влиянии вспышечной активности на биосферу вообще и на человека в частности (как на его общее состояние, так и на увеличение количества инфарктов миокарда, инсультов и пр. в период повышенной солнечной активности). В настоящее время в связи с освоением космического пространства особенно актуальным стал вопрос о природе вспышек и их прогнозировании, так как излучение, сопровождающее вспышки, является губительным для каждого организма, находящегося за пределами земной атмосферы. Изучение вспышек может оказать существенную помощь в решении проблемы управляемого термоядерного синтеза, важность которой трудно переоценить.

Систематические исследования вспышек начались в конце 30-х годов. Несмотря на огромное количество работ, посвященных статистике, динамике и морфологии вспышек (преимущественно по наблюдениям в линии H_{α} водорода), физические условия, особенности структуры и другие характеристики вспышек известны довольно приближенно. В то же время для решения вопроса об источниках энергии вспышек и для выяснения природы солнечных вспышек необходимо всестороннее изучение всех видов их радиации.

РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ СОЛНЦА

Роль рентгеновского диапазона как нового информативного источника знаний о Вселенной была давно осознана астрофизиками. Еще до начала прямых наблюдений жесткое рентгеновское излучение было об-

наружено по измерениям степени ионизации слоя D ионосферы. 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.

Первые прямые измерения солнечного рентгеновского потока были проведены в США в конце 50-х годов группой Дж. Уинклера и Л. Петерсона при помощи регистраторов – простых сцинтилляционных счетчиков, установленных на воздушных шарах. Впоследствии такие же регистраторы, измерявшие излучение от всего Солнца в широком спектральном диапазоне, были установлены на ракетах и спутниках. Но настоящее развитие рентгеновская астрономия получила тогда, когда были созданы мощные ракеты и большие космические станции, способные нести на борту достаточно сложные и высокотехнологичные телескопы, имеющие пространственное и спектральное разрешение.

В области физики Солнца первый такой прорыв связан с запуском в 1973 году американской орбитальной космической станции “Skylab”, оснащенной солнечным рентгеновским телескопом. Наблюдения проводились подготовленными астронавтами, среди которых был физик Эдвард Гибсон, автор монографии “Спокойное Солнце”. Солнечные рентгенограммы снимались на фотопленку, и отснятые материалы возвращались на Землю для обработки (рис. 1).

Наблюдения на “Skylab” дали довольно много открытий: были обнаружены корональные дыры – участки короны с пониженным свечением в рентгеновском диапазоне, характеризующиеся открытой геометрией магнитных силовых линий, разомкнутых в межпланетное пространство; были открыты рентгеновские яркие точки, соответствующие мельчайшим (так называемым эфемерным) активным областям; были выявлены корональные транзиенты – гигантские выбросы массы из короны и многое другое.

Следующий этап был связан с программой Года солнечного максимума (1971–1981 годы) и работавшими в тот период орбитальными станциями “Solar Maximum Mission (SMM)” (США, Европа) и “Hinotori” (Япония). Основной упор был сделан на спектроскопию вспышек в рентгеновской области спектра. Было открыто явление хромосферного испарения вещества в солнечной вспышке, за которым следует его выброс в корону с огромными скоростями, что проявляется в рентгеновских линиях. Были обнаружены вспышки в короне – увеличение яркости в рентгеновских и ульт-

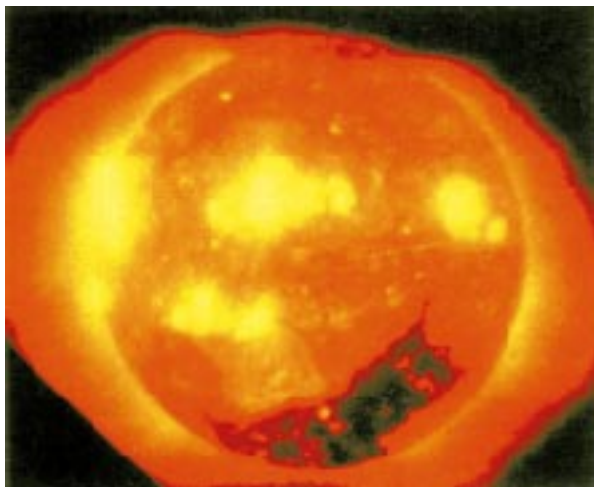


Рис. 1. Солнце в рентгеновских лучах (космическая лаборатория “Skylab”). Ярко светится горячий газ солнечной короны, особенно заметный над активными областями Солнца

рафиолетовых лучах (рис. 2), не сопровождаемое одновременным ростом яркости в хромосфере.

Последний, завершившийся этап связан с программой “Вспышки 22-го солнечного цикла” и полетом орбитальной обсерватории “Yohkon” (Япония, США), оснащенной рентгеновскими телескопами для получения изображения Солнца в мягком и жестком диапазонах (рис. 3).

Телескоп мягкого рентгена впервые обеспечил возможность проследить динамику корональных петель. Эти петли в обычном, не возбужденном вспышкой состоянии представляют собой слабоконтрастные образования, которые не были доступны наблюдениям ранее. 2 ноября 1992 года удалось впервые пронаблюдать процесс образования петельной туннельной структуры, вершина которой периодически вытягивалась вверх и вновь замыкалась. Процесс оказался аналогичен процессу вытягивания хвоста магнитосферы Земли в ходе магнитной суббури. Удалось также проследить изменения петельной структуры активной области во время мощной вспышки (рис. 4). Этот процесс взрывного типа идет, конечно, быстро и требует не только высокого временного разрешения, которое ранее было недоступно, но и большого динамического диапазона приемника излучения, так как он идет одновременно в ярких и слабосветящихся структурах. Происходит не только вытягивание петель высоко в корону над активной областью, но и сложная структурная перестройка в нижней короне, характер которой не выявляется однозначно при одноаспектных (то есть с одного направления) наблюдениях.

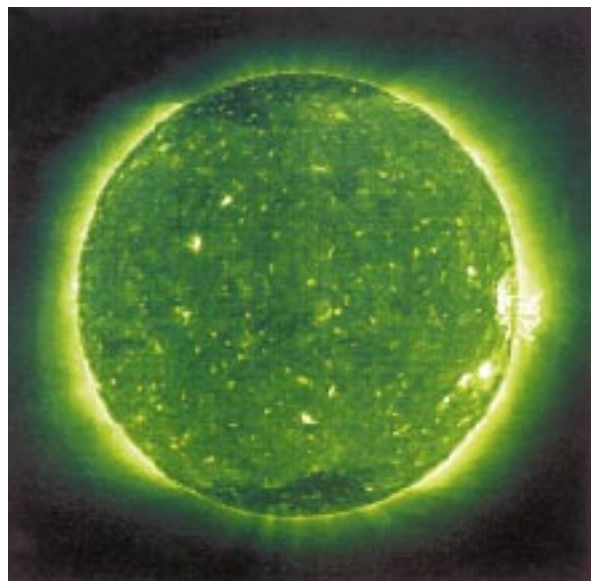


Рис. 2. Изображение горячей ($1,5 \cdot 10^6$ K) солнечной короны, полученное в ультрафиолетовых лучах обсерваторией SOHO (Solar and Heliospheric Observatory), запущенной в декабре 1995 года, то есть в период минимума солнечной активности. Многочисленные яркие области – вспышки в короне – видны по всему диску Солнца. Совокупность вспышечных корональных петель на краю диска (справа) отражает эффект присутствия магнитного поля, силовые линии которого формируют анфиладу арок, образуя своеобразный туннель. Эти и другие данные, полученные SOHO, показывают, что Солнце непредвиденно активно даже в течение спокойной фазы 11-летнего цикла (из материалов NASA Resources for Educators)

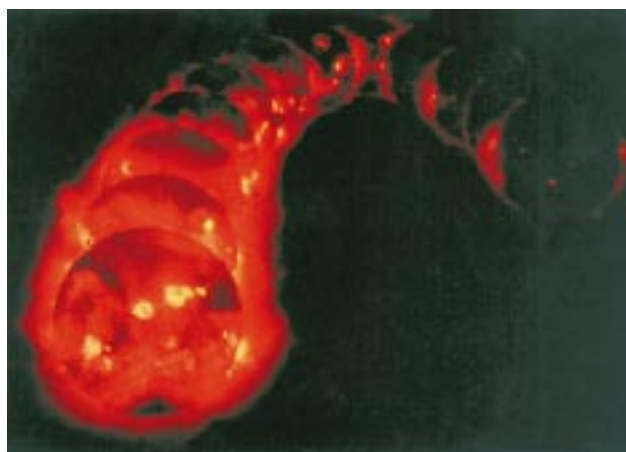


Рис. 3. Серия изображений Солнца, полученных обсерваторией “Yohkon”. Видны временные вариации мягкого рентгеновского излучения. Наблюдения выполнялись на телескопе, регистрирующем кванты в области ~ 10 Å с энергией ~ 1 кэВ (из материалов NASA Resources for Educators)

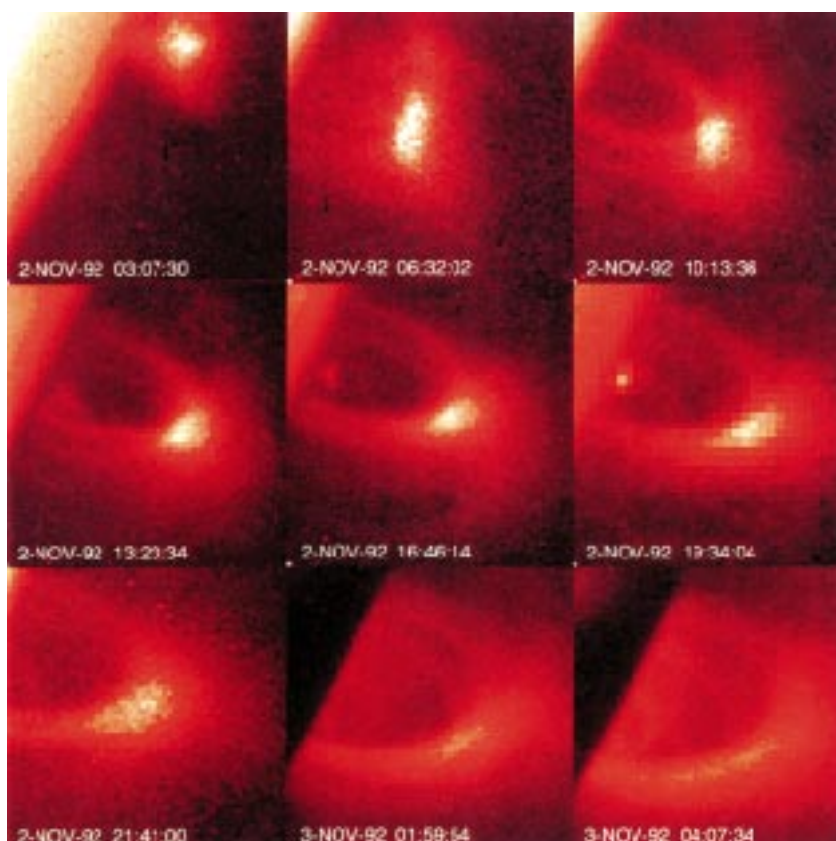


Рис. 4. Девять изображений рентгеновской (~1 кэВ, ~10 Å) вспышки 2 ноября 1992 года, полученных в различные моменты времени обсерваторией “Yohkoh” (из статьи J. Seely *et al.*: Proc. Kofu Sympos. NRO. Report № 360, July 1994). Лимб Солнца хорошо виден на последних двух снимках.

Первое изображение с хорошей экспозицией получено через бериллиевый фильтр в 03^h07^m30^s вблизи максимума вспышки. Самой замечательной особенностью в полной последовательности изображений является яркая эмиссионная область на вершине петли. Вид этой вспышки большой длительности изменялся очень медленно: к 10^h13^m36^s яркая эмиссионная область состояла, возможно, из трех петель, каждая из которых оставалась яркой на вершине. По мере роста и изменения структуры петли наиболее яркая область оставалась по-прежнему на вершине петли и даже в 21^h41^m00^s все еще различима. Это означает, что энергия была запасена в вершине петли и механизм нагрева действовал в течение периода порядка десятков часов. В течение этого периода видимая высота этой яркой области над солнечным лимбом увеличилась от 27 000 до 90 000 км

Некоторые неоднозначности в описании системы вспышечных петель можно снять при стереоскопических многоаспектных наблюдениях, и здесь мы логически подходим к обоснованию необходимости наблюдений Солнца с двух и более направлений, то есть наблюдений с определенной стереоскопической базой. Поскольку корона является оптически тонким объектом, то изображения, получаемые с одним инструментом, то есть из одной какой-либо точки пространства, представляют собой интеграл по лучу зрения. Результирующая двумерная картина неизбежно содержит неоднозначность по третьему измерению. Эта неоднозначность может быть устранена применением томографии, то есть путем наблюдений с нескольких направлений (в идеале не менее четырех под углом 45° друг к другу) и последующим восстановлением трехмерного изображения. Принципы солнечной томографии заимствуются из медицинской томографии, основы которой хорошо известны.

Все изложенное позволяет сделать вывод, что рождение новых методов внеатмосферных наблюдений Солнца в рентгеновском диапазоне и интенсивные наблюдения в рамках международных кооперативных наблюдательных программ привели к ряду открытий в физике Солнца. Созданные к настоящему времени

комплексы рентгеновских телескопов могут быть использованы в многоаспектных наблюдениях Солнца, призванных дать принципиально новую информацию о пространственной структуре быстропотекающих процессов в солнечной короне.

ПАРАМЕТРЫ РЕНТГЕНОВСКИХ ВСПЫШЕК В 11-ЛЕТНИХ ЦИКЛАХ СОЛНЦА

Солнечные вспышки представляют собой быстрый процесс высвобождения большого количества энергии. В последние десятилетия аналогичные процессы — звездные вспышки — наблюдаются на некоторых классах звезд. Наиболее вспышчивыми являются красные карликовые звезды типа UV Кита [1]. Интерпретация вспышек на них основывается на внутренней физической аналогии между активностью Солнца и активностью красных карликовых звезд, конвективные зоны которых подобны. В результате сопоставления двух типов вспышечной активности достигается более полная картина генерации вспышек на звездах. Однако общие успехи моделирования, в частности солнечных вспышек, до некоторой степени снизили интерес к изучению таких параметров вспышек, как их интегральные (по времени) энергии и временные шкалы

(длительность энерговыделения), которые несут много информации об энергетике вспышек во всем диапазоне энерговыделения. Попыткой восполнить этот пробел явились исследования [2, 3] энергетических спектров рентгеновских вспышек, выполненные для одного и двух 11-летних циклов солнечной активности. Вспышки отражают энергетику соответствующих магнитных полей, и поведение параметров вспышек в 11-летнем цикле представляет значительный интерес.

СОЛНЕЧНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ

Оценки энергии вспышек в [4] показывают, что распределения их интегральных по времени значений энергий могут быть представлены степенной функцией $N \sim E^{-\beta}$. Универсальность такого распределения была доказана для вспышек рентгеновского диапазона (1–8 Å), причем показатель энергетического спектра β заметно изменялся в цикле [2, 3]. Энергетический спектр вспышек Солнца, то есть зависимость частоты вспышек с некоторой полной энергией излучения от значения этой полной энергии, можно строить для короткого интервала времени (год). Для этого рассчитывается накопленное число вспышек за год $N(E_m)$, то есть средняя частота вспышек с энергией, превышающей заданное значение энергии. Пример таких зависимостей для различных фаз цикла Солнца показан на рис. 5. Исходя из линейного участка соотношения $\lg N - \lg E$, можно определить показатель β как наклон прямой в двойных логарифмических координатах, что соответствует степенной функции.

Энергетические спектры солнечных вспышек в области мягкого рентгеновского излучения были построены [3] для каждого года отдельно – с 1972-го по 1974-й и с 1977-го по 1995-й, – и обнаружена четкая корреляция спектральных индексов с фазой солнечного цикла (рис. 6). Кроме спектральных индексов по интегральному распределению определялись минимальные и максимальные, а также средние энергии вспышек за каждый год цикла.

Средняя мощность энерговыделения в единичном вспышечном акте рассчитывалась по соответствующим среднегодовым параметрам. Практически все энергетические параметры вспышек заметно меняются с изменением фазы цикла, возрастая в целом от минимума к максимуму цикла.

В литературе по звездным вспышкам [1, 5] природа цикличности на звездах практически не объясняется, однако рассматривается общий аспект роли магнитных полей в образовании вспышек. Такое обсуждение, очевидно, полезно, поскольку магнитная активность Солнца (звезды класса G2) носит циклический характер, что не вызывает никаких сомнений. Поэтому возможно,

что изменение энергетических параметров солнечных вспышек в цикле является следствием 11-летнего магнитного цикла. Вместе с тем в звездном аспекте связь вспышек с магнитными полями вызывает множество возражений. Так, появление долгоживущих магнитных полей порядка нескольких тысяч эрстед (“Каталог магнитных звезд Бэбкокка”) является наблюдательным фактом, но ни одна из этих звезд не обладает ярко выраженной вспышечной активностью. Наоборот, у вспыхивающих звезд не подтверждается наличие сильных магнитных полей. Трудности имеются и в объяснении механизма аннигиляции магнитного поля как энергоисточника вспышек. Поэтому полученные данные [2, 3] можно рассматривать в свете остающейся нерешенной проблемы звездно-солнечных вспышек.

Рентгеновские наблюдения солнечных вспышек более удобны для статистического анализа, так как они аналогичны наблюдениям звездных вспышек, где сразу получается кривая блеска, и имеют преимущество перед оптическими солнечными наблюдениями, где необходимо проводить интегрирование по поверхности вспышек.

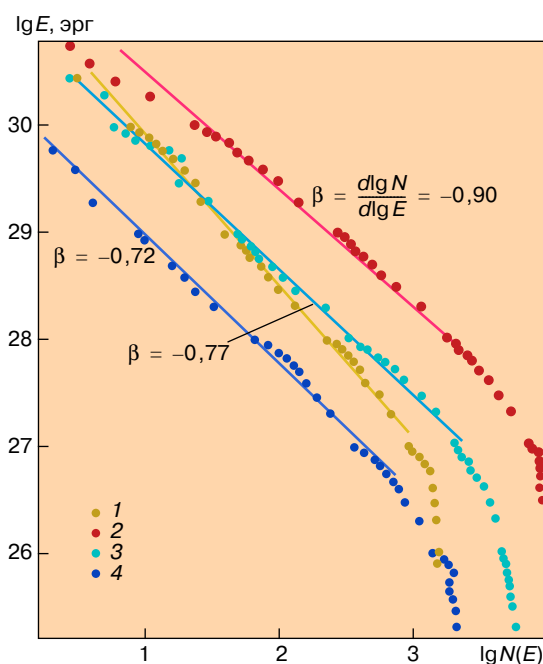


Рис. 5. Интегральные энергетические спектры для эпох: 1 – подъем (1977–1978 годы); 2 – максимум (1979–1982 годы); 3 – спад (1983–1985 годы), 4 – минимум 11-летнего цикла (1986–1987 годы). Наклон линейного участка дает показатель спектра β

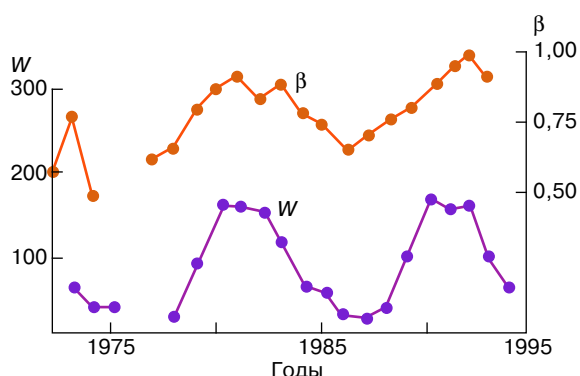


Рис. 6. Изменение показателя β интегрального энергетического спектра рентгеновских вспышек в течение двух циклов солнечной активности (W – числа Вольфа)

ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВСПЫШЕК

Кроме распределения вспышек по энергиям определенный интерес представляет и распределение вспышек по длительности рентгеновского всплеска. Фактически оно отражает действие по времени первичного источника энерговыделения. Первые исследования в этом направлении показали, что длительность всплеска в жестком рентгеновском диапазоне существенно зависит от уровня солнечной активности в данный период.

Мягкий рентгеновский диапазон (1–8 Å) представляет интерес, поскольку он описывает тепловую фазу энерговыделения с длительностями от 60 с до ~10 ч, охватывая тем самым практически весь временной диапазон оптических вспышек. С этой целью были построены дифференциальные распределения вспышек по длительности, которые также аппроксимируются степенной функцией. Отметим, что общий характер спектра длительностей в области максимума (продолжительность 300–720 с) практически не меняется. Обращает на себя внимание тот факт, что форма дифференциального спектра длительностей вспышек острее и уже именно в минимуме цикла, то есть вероятность наблюдать вспышки продолжительностью 6–10 мин больше в минимуме 11-летнего цикла.

Рентгеновское излучение вспышек в диапазоне 1–8 Å обозначается соответствующим индексом (А, В, С, М, X), характеризующим порядок величины потока в этом диапазоне (10^{-8} , 10^{-7} Вт/м² и т.д.) с последующим числом в пределах от 1 до 9,9, дающим само значение потока.

Некоторые представления о частоте появления вспышек баллов В, С, М, X в течение года и распределении их в цикле солнечной активности получены [6] из анализа годичных распределений вспышек по баллам за период 1977–1995 годов. Можно отметить, что:

а) в пределах цикла присутствуют вспышки практически всех баллов, но удельный вес (% от всех вспышек для каждого года) слабых (балла В) больше в минимуме цикла, а сильных (балла М, X) – в максимуме;

б) примерно 66% всех наблюдаемых явлений – это вспышки балла С и 21% – вспышки балла В (за период 1977–1995 годов).

Поведение функции распределения относительно количества вспышек каждого балла в течение двух циклов солнечной активности зависит от фазы солнечного цикла.

Оценки годичных значений средней продолжительности вспышек показали общую зависимость между продолжительностью и баллом вспышки, то есть продолжительности вспышек увеличиваются с возрастанием их балла и составляют в среднем 15, 25, 45, 76 мин соответственно для классов В, С, М, X.

Систематическое количественное исследование временных и энергетических характеристик вспышек во всем диапазоне их изменения позволило вывести важные заключения о характере протекания вспышечной активности Солнца, и в частности установить изменения временных и энергетических параметров вспышек с фазой 11-летнего цикла.

Корреляция всех характеристик энергетического спектра солнечных вспышек в области мягкого рентгеновского излучения с фазой 11-летнего цикла Солнца может служить отправной фундаментальной зависимостью для выявления циклической переменности на карликовых звездах типа UV Кита.

ЛИТЕРАТУРА

1. Герриберг Р.Е. Солнечная активность в мире звезд. М.: Знание, 1990. 64 с.
2. Kasinsky V.V., Sotnikova R.T. Solar and Stellar Flares. I.A.U. Colloq. № 104. Poster Papers. Stanford, USA, 1989. P. 255–258.
3. Sotnikova R.T. // JOSO Annu. Rept. 1998. P. 158–159.
4. Hudson H.S. // Solar Phys. 1991. Vol. 133. P. 357–369.
5. Кацова М.М., Лившиц М.А. Активность молодых звезд. М.: Знание, 1986. 61 с.
6. Сотникова Р.Т., Москаленко А.В. // Тр. VII симпоз. по солнечно-земной физике России и стран СНГ. Троицк, 1999. С. 156–161.

Рецензент статьи А.М. Черепашук

* * *

Раиса Тимофеевна Сотникова, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей и космической физики Иркутского государственного университета. Область научных интересов – физика Солнца. Автор 50 научных публикаций и четырех учебных пособий.