

УДК 523.985.3

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПОЯСОВ АКТИВНОСТИ СОЛНЦА ПРИ ПЕРЕХОДЕ ОТ ВСПЫШЕК К НАНОВСПЫШКАМ

© 2024 А. С. Кириченко^{1*}, А. А. Рева¹, С. А. Богачев¹, И. П. Лобода¹¹Институт космических исследований РАН, Москва, 117997 Россия

Поступила в редакцию 29 февраля 2024 года; после доработки 10 июня 2024 года; принята к публикации 12 июня 2024 года

По данным комплекса научной аппаратуры «ТЕСИС» на борту «КОРОНАС–Фотон», полученным в условиях минимума солнечной активности 2009 года, были проанализированы координаты положения на диске 1014 солнечных вспышек, рентгеновский класс которых составлял от А0.003 до С2.7. Обнаружено наличие изменения пространственного распределения в области событий класса А. По мере уменьшения мощности вспышек наблюдается переход от их локализации в поясах активности к равномерному широтному распределению. Также получена оценка асимметрии положения событий на солнечном диске — 0.009. Таким образом, установлено, что число вспышек в Южном и Северном полушарии практически идентично.

Ключевые слова: Солнце: активность—Солнце: вспышки

1. ВВЕДЕНИЕ

Циклические изменения активности звезд открыты достаточно давно и широко исследуются в настоящее время (Henry et al., 1995; Verduugina 2005, Puzin et al., 2016). Безусловно, наиболее детально изучен солнечный цикл (Hathaway, 2015). Он проявляется в совокупности закономерностей, включающих в себя, в частности, вариацию числа солнечных пятен (Hathaway et al., 2002; Kleeorin et al., 2016) и их распределения на диске Солнца (Nandy and Choudhuri, 2002), а также особенностей изменения локальной и глобальной структур магнитного поля (Lin, 1995; Schrijver and De Rosa, 2003). В начале цикла области сильного магнитного поля формируются преимущественно на высоких широтах, а затем спускаются практически к самому экватору. Таким образом, существуют так называемые пояса активности, широты которых зависят от конкретной фазы цикла.

В ряде работ была показана прямая корреляция между характеристиками магнитного поля и мощностью вспышек, регистрирующихся в соответствующих областях (Pevtsov et al., 2003; Su et al., 2007). Для ранжирования вспышечных событий в солнечной физике наиболее часто применяется рентгеновская классификация, основанная на потоке излучения в диапазоне 1–8 Å. Принято выделять пять классов¹, отличающихся друг от друга на порядок по потоку излучения в указанном

диапазоне — от 10^{-8} до 10^{-4} Вт м⁻². Другая базовая классификация основывается на суммарном энерговыделении во вспышках и делит вспышечные события на три основные категории: обычные и мощные вспышки (10^{30} – 10^{33} эрг), микровспышки (10^{27} – 10^{30} эрг), нановспышки (10^{24} – 10^{27} эрг) (Aschwanden, 2019). Связь указанных двух классификаций не совсем однозначна, однако классы С, М и Х примерно соответствуют обычным и мощным вспышкам, А и В — микровспышкам, а нановспышки не имеют привязки к рентгеновским классам, поскольку их интенсивность лежит существенно ниже соответствующих уровней (Hannah et al., 2011).

С учетом перечисленных особенностей локализации областей сильного магнитного поля на солнечном диске, а также корреляции между силой вспышек и характеристиками магнитного поля, мощные вспышки должны происходить преимущественно в поясах активности, что и подтверждается наблюдениями (Joshi et al., 2010; Pandey et al., 2015). В таком случае возникает закономерный вопрос, является ли аналогичным пространственное распределение для событий меньшей интенсивности. Для развития микровспышек требуются значительно менее сильные поля (Kirichenko and Bogachev, 2017b), и, как следствие, можно сделать предположение об ином характере локализации для таких событий — с более широкими поясами активности и тенденцией к переходу в равномерное распределение.

К подобному выводу можно прийти также,

*E-mail: kirichenko@cosmos.ru

¹А, В, С, М, Х — в порядке возрастания интенсивности.

отталкиваясь от особенностей вспышечных событий меньшей интенсивности по сравнению с микровспышками — нановспышек. Учитывая, что они имеют равномерное широтное распределение (Bogachev, 2023), а обычные и мощные вспышки довольно четко локализованы в выделенных зонах, можно предположить существование перехода от одного типа распределения к другому в области микровспышек.

На сегодняшний день существует крайне ограниченное количество наблюдений солнечных микровспышек в мягком рентгеновском диапазоне. Для детального изучения таких слабых событий необходим низкий фоновый уровень излучения (минимум солнечной активности), а также высокая чувствительность приборов.

Наиболее масштабный анализ микрособытий представлен в работе Christe et al. (2008), где проводилось исследование более 25 000 микровспышек преимущественно классов А и В. Было показано, что они происходят только в активных областях, а их локализация на диске соответствует хорошо изученному распределению солнечных пятен.

В работе Reva et al. (2012) были проанализированы 169 событий по данным рентгеновского спектрогелиометра на борту космического аппарата «КОРОНАС-Ф» (Zhitnik et al., 2003). Авторы использовали термин «горячие рентгеновские точки» для их определения. Соответствующие события характеризовались коротким временем жизни (5–100 минут) и высокой температурой плазмы (5–50 МК), в отличие от ярких рентгеновских точек, продолжительность существования которых может достигать десятков часов, а температура не превышает нескольких миллионов градусов (Golub et al., 1974). Reva et al. (2012) показали, что горячие рентгеновские точки практически полностью локализованы в поясах активности и лишь незначительное количество наблюдается вблизи экватора. Данный факт дополнительно отличает их от ярких рентгеновских точек, имеющих равномерное распределение.

Уникальные данные по микрособытиям были получены в условиях минимума солнечной активности 2009 года комплексом научной аппаратуры «ТЕСИС» (Kuzin et al., 2011) на борту спутника «КОРОНАС-Фотон» (Kotov, 2011). Было показано, что даже самым слабым микрособытиям присущи такие атрибуты мощных вспышек, как нагрев плазмы до нескольких миллионов градусов (Kirichenko and Bogachev, 2017a) и корональные выбросы массы (Zhou et al., 2003; Kirichenko and Bogachev, 2013; Reva et al., 2017). На основе данных приборов комплекса «ТЕСИС» в работе Kirichenko et al. (2023) был проанализирован массив вспышек в диапазоне от А0.1 до С2.7. Для

локализации событий использовались изображения высокотемпературного канала, чувствительного к излучению плазмы с температурой порядка 4 МК и выше. Было определено, что тенденция перехода к равномерному пространственному распределению не наблюдается в явном виде. В настоящей работе мы используем данные за тот же временной промежуток, однако применяем иной подход к отбору событий и анализу, что существенно уменьшает нижнюю границу мощности исследуемых событий.

2. ДАННЫЕ И ОБРАБОТКА

В работе использовались полученные в условиях глубокого минимума солнечной активности в 2009 году данные двух приборов комплекса научной аппаратуры «ТЕСИС»: рентгеновского спектрофотометра SphinX² (Gburek et al., 2013) и двух вакуумных ультрафиолетовых телескопов FET³ (Kuzin et al., 2009).

SphinX работал в режиме пофотонного считывания и позволял регистрировать спектры излучения с энергией от 1 до 15 кэВ. Ключевой особенностью спектрофотометра является его высокая чувствительность, превышающая чувствительность рентгеновского монитора GOES⁴ (Bornmann et al., 1996; Chamberlin et al., 2009) более чем на два порядка.

Прибор FET представлял собой классический телескоп, выполненный по однозеркальной схеме Гершеля. Пространственное разрешение составляло 1"7. Рабочий спектральный диапазон телескопа находился вблизи линии Fe IX 171 Å, соответствующей излучению «холодной» плазмы спокойной короны с температурой около 1 МК.

Для комплексного анализа микрособытий мы рассматриваем объединенную выборку микровспышек, полученную в рамках настоящей работы, а также предыдущего исследования авторов (Kirichenko et al., 2023). Временные периоды, за которые получены данные в обеих работах, практически полностью совпадают (с марта по ноябрь 2009 года). Основное отличие заключается в методе поиска микрособытий. Предшествующая работа была построена на данных спектрогелиометра MISH⁵ (Reva et al., 2021). Характерная особенность прибора заключается в его нечувствительности к излучению плазмы с температурой менее 4 МК. Его рабочий спектральный диапазон находится вблизи дублета водородоподобной

²Solar PHotometer In X-rays.

³Full-disk EUV Telescopes.

⁴Geostationary Operational Environmental Satellite.

⁵MgXII Imaging SpectroHeliometer.

линии Mg XII $\lambda 8.42 \text{ \AA}$, заметное излучение в которой генерируется, начиная с указанной выше температуры.

Первичный отбор событий в настоящей работе проводился по данным спектрофотометра SphinX. Для этого были восстановлены временные профили излучения в диапазоне 1–8 \AA путем интегрирования спектров в соответствующей энергетической области. Выбор диапазона обусловлен его использованием в качестве базы в основной классификации солнечных вспышек.

Использовались выборки данных из работ Gryciuk et al. (2017) и Kirichenko and Bogachev (2017a). Оба массива сильно пересекаются друг с другом, поскольку результатом работы Gryciuk et al. (2017) стало создание, по сути, доработанной версии первоначального каталога микровспышек от разработчиков аппаратуры, принятого как базовый в статье Kirichenko and Bogachev (2017a). Ключевое отличие второй выборки данных заключается в использовании двухтемпературной модели спектральной диагностики физических параметров вспышечной плазмы. При этом класс события определялся именно по высокотемпературной компоненте, которая рассматривалась как вспышечная. Такой подход позволил существенно повысить точность вычисления мощности микрособытий. Детальное описание соответствующей процедуры приведено в самой работе. Основу рассмотренной в настоящем исследовании выборки составили данные из статьи Kirichenko and Bogachev (2017a), дополненные событиями из работы Gryciuk et al. (2017). При этом рассматривались только те микровспышки, максимум которых по времени отличается не более чем на 5 минут от времени регистрации ближайшего кадра, полученного телескопом FET. Таким образом, по данным спектрофотометра определялся рентгеновский класс события, а также время его максимума. Координаты рассчитывались с помощью изображений телескопа FET. Для этого проводился визуальный анализ серии кадров диска Солнца с целью поиска признаков вспышечного события. Отбирались изображения, время регистрации которых отличается не более чем на полчаса от момента максимума вспышки. Признаком потенциальной вспышки считалось выраженное увеличение яркости или существенное перестроение структуры магнитных линий в соответствующей области. При этом из рассмотрения устранялись события, во время которых одновременно присутствовало более одного претендента на вспышечную область. В случае слабых компактных микровспышек, идентификация которых затруднена, проводилась дополнительная верификация путем сравнения временного профиля мягкого

рентгеновского излучения по данным спектрофотометра и динамики яркости в предполагаемой вспышечной области по изображениям телескопа. На рис. 1 приведен пример такого рода верификации для одной из отобранных микровспышек. Видно хорошее согласование временных профилей в обоих спектральных диапазонах, подтверждающее корректность определения вспышечной области.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Пространственное распределение отобранных микровспышек приведено на рис. 2. Для анализа зависимости на большем динамическом диапазоне, помимо проанализированных в настоящей статье событий (красные ромбы), мы также добавили на рисунок результаты предыдущей работы авторов (Kirichenko et al., 2023), полученные по данным чувствительного только к излучению высокотемпературной плазмы спектрогелиометра (дублет линии Mg XII $\lambda 8.42 \text{ \AA}$) и спектрофотометра SphinX (синие треугольники), и рентгеновского монитора GOES (зеленые круги). Итоговая выборка состоит из микровспышек, рентгеновский класс которых составляет от A0.003 до C2.7. Наблюдаемые пространственные кластеры точек соответствуют формированию активных областей с последующей серией микровспышек в них. Для наглядности голубыми кругами нанесены зоны, занимаемые активными областями, — данные «Solar Region Summary» (SRS) из каталога NOAA. Приведены их положения и размеры для тех дней, в которые регистрировались микровспышки из итоговой выборки.

Связь гелиошироты положения микрособытий на диске и их интенсивности проиллюстрирована на рис. 3. Как и ожидалось, по мере уменьшения мощности исследуемых событий наблюдаются все признаки перехода их пространственного распределения по поясам активности к более равномерному.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Благодаря низкому уровню солнечной активности в 2009 году, а также высокой чувствительности приборов комплекса научной аппаратуры «ТЕСИС», удалось получить уникальные данные по микрособытиям, на основе которых было проведено настоящее исследование.

В нашей работе под микровспышкой мы подразумеваем любой импульсный процесс энерговыделения, наблюдаемый в виде кратковременного увеличения потоков мягкого рентгеновского излучения и оцениваемый по рентгеновской классификации как событие класса В и ниже. В выборке присутствуют также события класса С (в пределах его

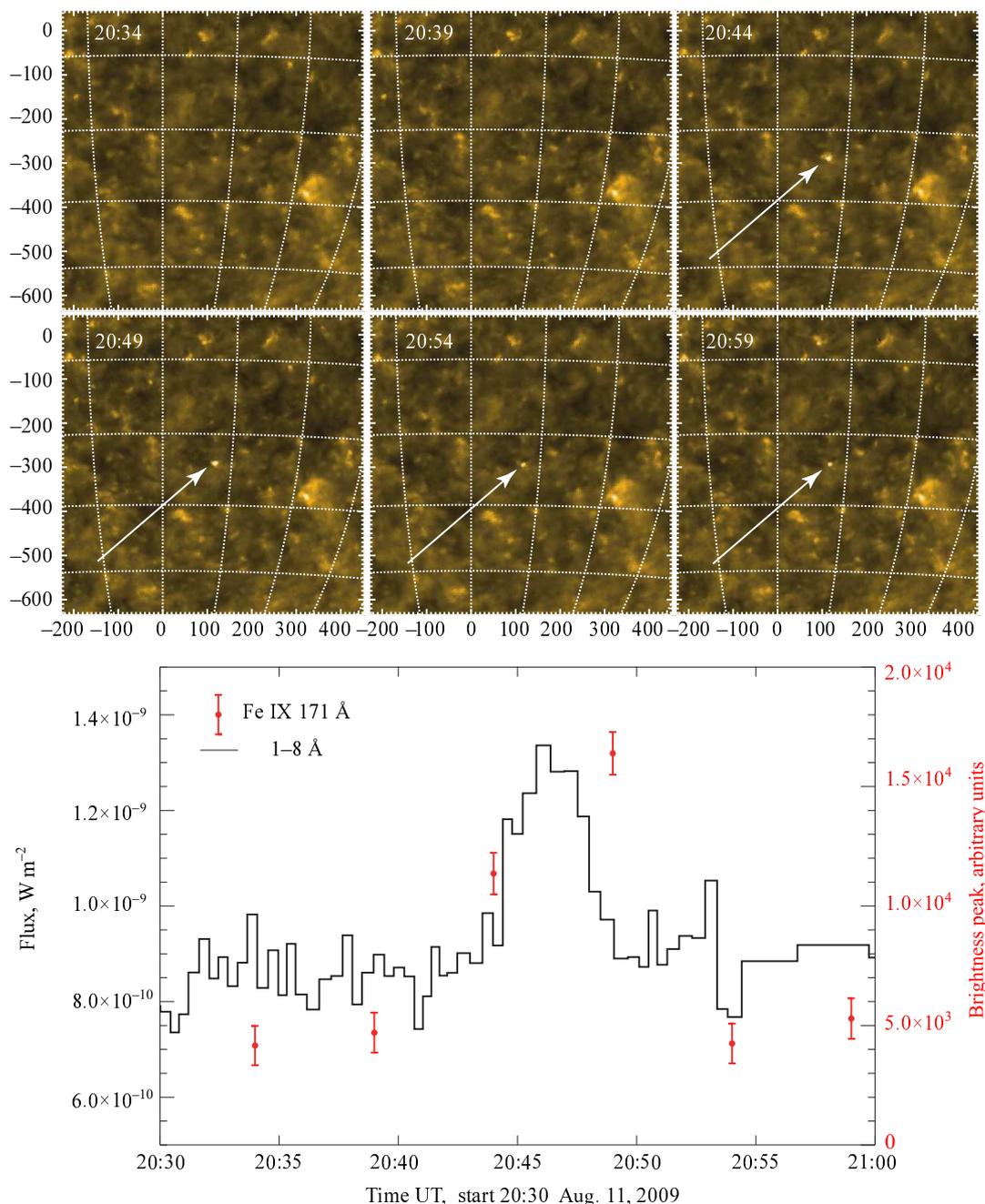


Рис. 1. Панель (а): динамика области, в пределах которой была зафиксирована микровспышка (период регистрации кадров — 5 минут). Пиковое значение яркости для каждого фрагмента приведено на временном профиле нижней панели. Панель (б): временной профиль мягкого рентгеновского излучения по данным спектрофотометра SphinX (черный цвет) и пиковые значения яркости вакуумного ультрафиолетового излучения по данным телескопа FET (красный цвет).

нижней границы), которые не принято относить к микровспышкам в классическом понимании. Также, учитывая полученный динамический диапазон потоков мягкого рентгеновского излучения в проанализированных событиях, можно утверждать, что часть из них должна быть отнесена к классу нановспышек. Однако мы не имеем достаточной информации, чтобы оценить реальную полную энергию соответствующих событий. Поэтому для

упрощения и ввиду некоторой условности деления на группы вспышек все события в настоящей работе позиционируются как микровспышки.

Достоверно были определены координаты для 488 микровспышек. Итоговая выборка, включающая в себя также данные из работы Kirichenko et al. (2023), составила 1014 событий. Такое существенное увеличение объема выборки по сравнению с

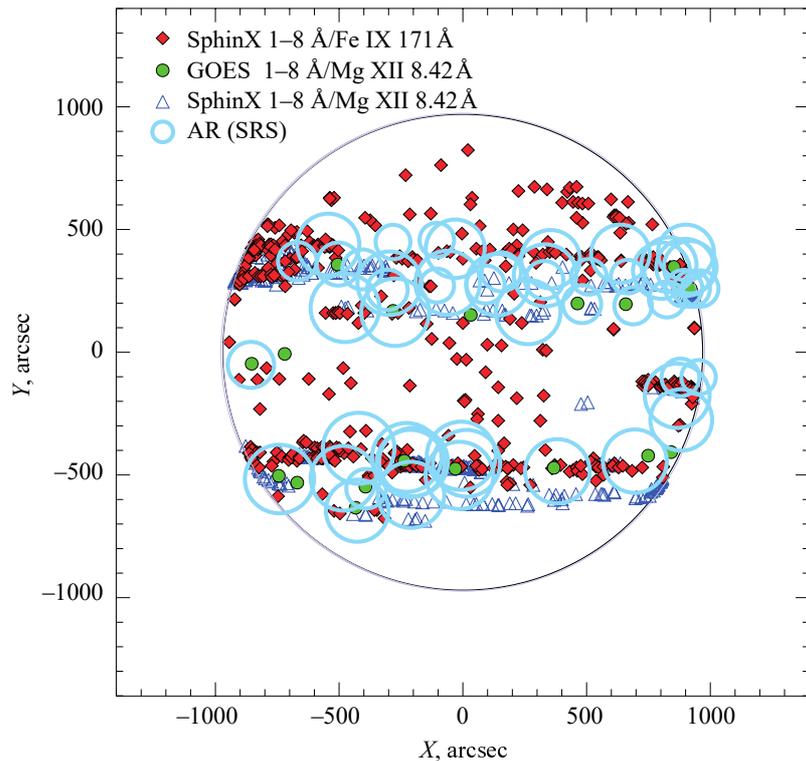


Рис. 2. Положение микрособытий на солнечном диске. Зеленые заполненные кружки — события, отобранные по данным GOES, каталога NOAA и MISH; синие треугольники — по данным SphinX и MISH; красные ромбы — по данным SphinX и FET; голубые круги — зоны, занимаемые активными областями, по данным каталога SRS NOAA.

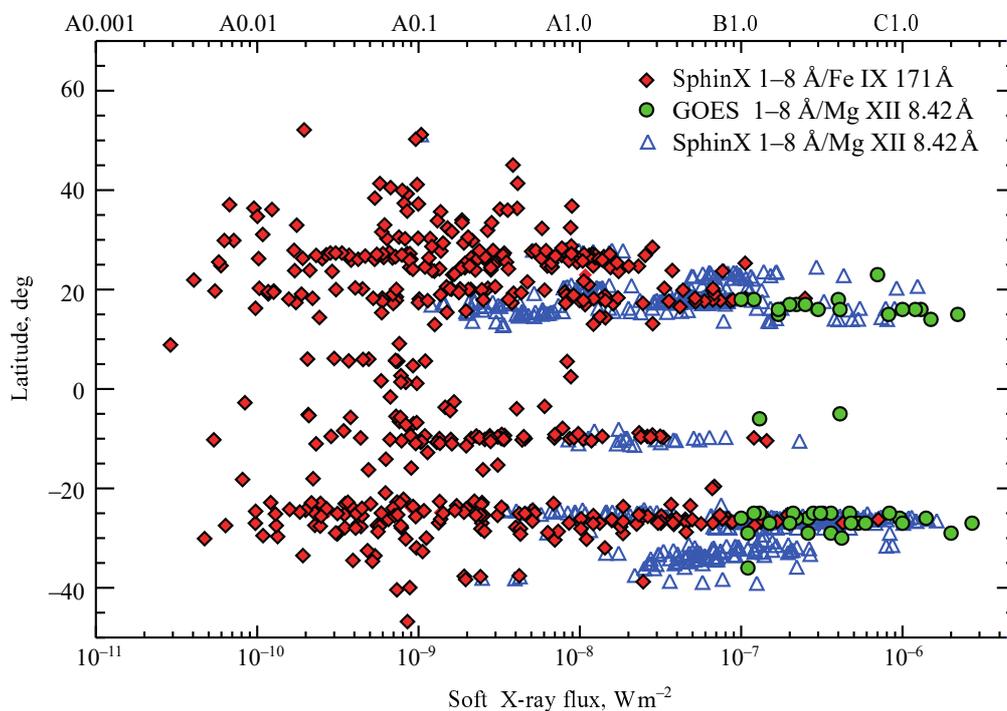


Рис. 3. Связь потока мягкого рентгеновского излучения в максимуме вспышки с широтой ее положения на диске. Зеленые круги — события, отобранные по данным GOES, каталога NOAA и MISH. Синие треугольники — отобранные по данным SphinX и MISH события. Красные ромбы — отобранные по данным SphinX и FET события.

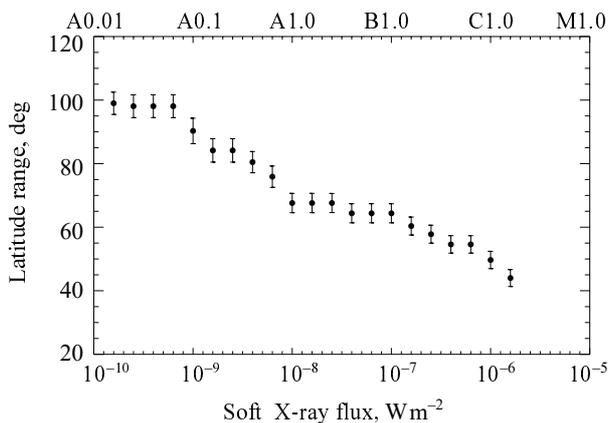


Рис. 4. Связь между широтной амплитудой и нижней границей рентгеновского класса вспышек, для которого установлена соответствующая амплитуда.

предыдущей работой стало возможным за счет использования кадров телескопа FET, обладавшего более высокой частотой регистрации изображений по сравнению с MISH.

Полученные широтные распределения хорошо подтверждают предположение, выдвинутое в качестве мотивации проведения настоящего исследования. Начиная примерно с уровня А по рентгеновской классификации, распределение существенно меняется и наблюдаются все признаки его перехода к равномерному. Широты микровспышек класса А и более мощных хорошо соответствуют результатам, полученным в работе Christe et al. (2008) для событий классов А и В.

События, класс которых оценивается как А (10^{-8} Вт м⁻²), и более мощные локализуются в трех поясах активности: северном, южном и экваториальном. Экваториальный пояс включает в себя группу пятен от предыдущего цикла. На рис. 4 показана связь между широтной амплитудой (разброс между самым северным и южным положением вспышечного события) и нижней границей класса вспышек, для которых была зафиксирована соответствующая амплитуда. Можно увидеть, что амплитуда достаточно быстро возрастает в области микровспышек класса А и ниже.

На рис. 5 приведено частотное распределение по широтам исследованных событий. При этом отдельно построены распределения для двух групп из выборки — событий класса А и выше (575 событий), а также событий, класс которых находится ниже уровня А (439 событий). Граница носит условный характер и выбрана на основании изменения широтного распределения именно в этой области. В целом видно, что слабые события действительно имеют более равномерное распределение, причем они заполняют практически весь диапазон широт. На распределениях обеих групп

Таблица 1. Характеристики групп микровспышек

Группа	Средняя широта, град	Диапазон широт, град
Северная	22 ± 6.4	$12.8 \div 52.2$
Южная	-27.8 ± 3.8	$-46.8 \div -20$

четко выделяются пояса активности. Соответствующие события преимущественно происходили в компактных активных областях. Основная часть микровспышек, лежащих вне поясов активности, регистрировалась в короткоживущих структурах, время жизни которых, как правило, не превышало суток или даже часов.

Рисунок 5 качественно демонстрирует разницу между широтными распределениями слабых вспышечных событий, класс которых не превышает уровень А, и более мощных. Мы выполнили количественную оценку статистической достоверности отличий распределений путем использования критерия однородности Колмогорова—Смирнова (Hodges, 1958).

Для расчетов мы использовали функцию `ks_2samp` из пакета `scipy.stats` языка Python (Virtanen et al., 2020). Указанная функция возвращает два параметра: величину статистики Колмогорова—Смирнова (KS) и критерий достоверности (p). Величина KS характеризует степень отличия выборок друг от друга — чем она больше, тем значимее статистическое различие между распределениями. Величина p определяет вероятность принадлежности двух выборок одному и тому же распределению.

Мы разбили выбранные вспышечные события на несколько кластеров в соответствии с их рентгеновским классом. Затем, используя критерий Колмогорова—Смирнова, мы провели сравнение выборок с группой, включающей события класса А0.001—А0.01. Рисунок 6 показывает зависимость KS и p от мощности вспышек. С увеличением силы событий растет расхождение с базовой группой А0.001—А0.01. Также уменьшается шанс того, что это различие случайно.

Обычно для отвержения гипотезы одинакового распределения используется пороговое значение $p \leq 0.05$. Согласно полученным результатам, этот уровень достигается в области классов А3—В1. Отсюда следует вывод, что переход от непрерывного распределения к локализации событий в поясах активности происходит в области вспышек класса А. Такое утверждение хорошо согласуется с субъективной оценкой, которую можно сделать на основе визуального анализа рис. 3.

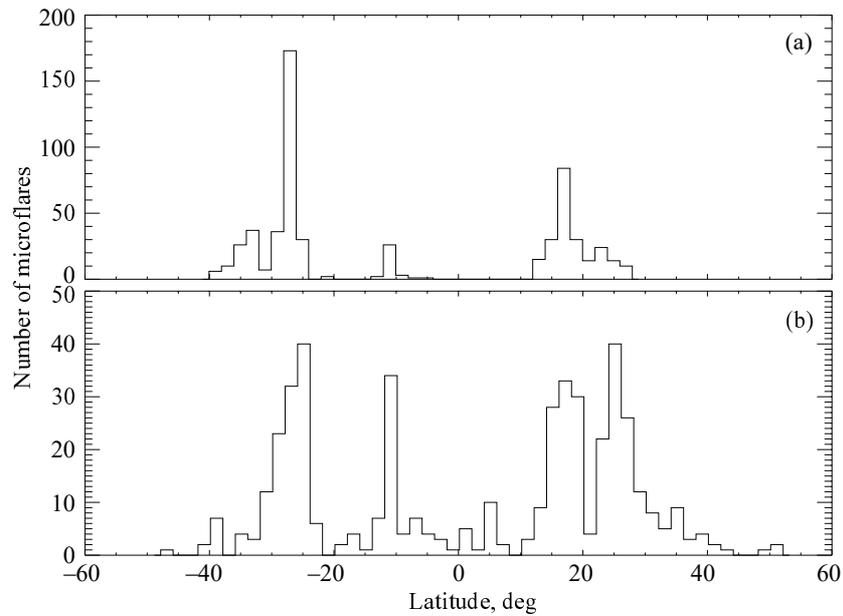


Рис. 5. Частотное распределение широт двух групп исследованных событий. Панель (a) — события класса A и выше. Панель (b) — события, класс которых находится ниже уровня A.

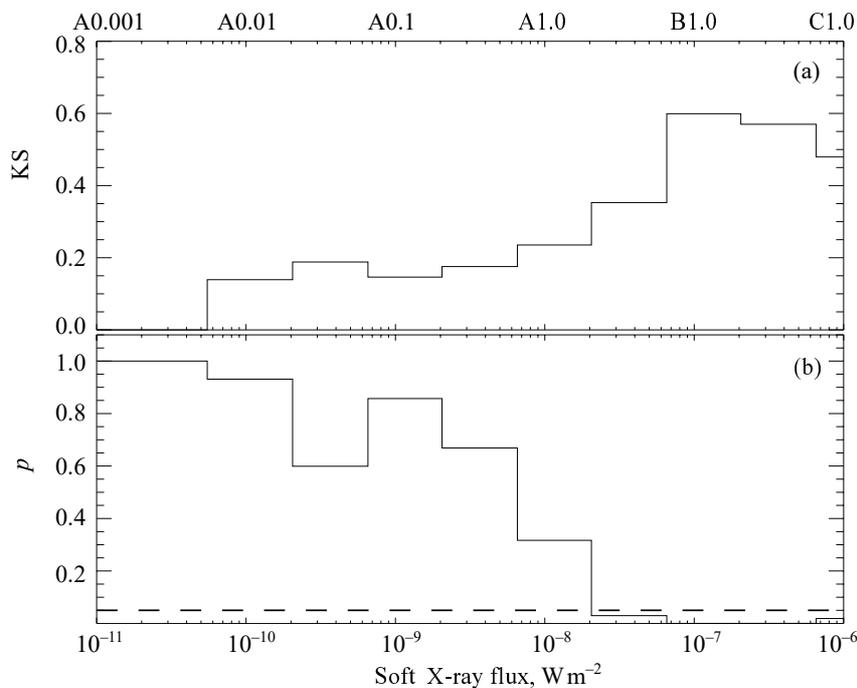


Рис. 6. Зависимость критериев KS и p однородности выборки A0.001 и нескольких групп проанализированных событий от их мощности. Пунктирной линией показан уровень $p = 0.05$.

В таблице 1 приведены диапазоны широт и их усредненное значение для северной и южной групп событий. Разделение проводилось на основании полученного частотного распределения обеих групп. К северной были отнесены все микровспышки с широтой более 10° , а к южной — менее -20° . Для общей выборки также было определено

значение асимметрии по формуле

$$A = \frac{N - S}{N + S}, \quad (1)$$

где N — число микровспышек в Северном полушарии, а S — число микровспышек в Южном полушарии. Значение асимметрии составило -0.07 , что

означает довольно высокий уровень симметричности распределения событий по диску. При этом, если взять в формуле 1 только события, относящиеся к северной или южной широтной группе, значение асимметрии станет еще меньше и составит 0.009. Возможно, при оценке асимметрии распределения солнечных вспышек следует использовать именно такой подход, не рассматривая остаточные активные области от предыдущего цикла. Но данное замечание может относиться только к начальной фазе солнечного цикла. Обнаруженный переход от четко локализованного широтного распределения для событий классов А и В к более равномерному в случае мировспышек меньшей интенсивности, по всей видимости, может свидетельствовать об отсутствии радикальных отличий между всеми этими событиями. Само расширение поясов активности может быть объяснено, например, снижением уровня магнитного потока во вспышечной области или степени сложности самой магнитной конфигурации, необходимых для формирования слабых микровспышек. Как следствие, увеличивается зона, в которой такие события могут развиваться.

На сегодняшний день получено достаточно много результатов, которые могут трактоваться как аргументы в пользу единой природы крупных вспышек и микрособытий. Так, достоверно установлено, что слабые события сопровождаются нагревом плазмы до температур в несколько миллионов градусов (Kirichenko and Bogachev, 2017b), корональными выбросами массы (Zhou et al., 2003; Kirichenko and Bogachev, 2013; Reva et al., 2017), магнитным пересоединением (Ulyanov et al., 2019) — отличия определяются преимущественно масштабированием соответствующих процессов. Мы полагаем, что в целом полученные результаты могут представлять интерес именно с точки зрения сравнения микрособытий и классических вспышек, однако выборка недостаточно велика для формирования какого-либо однозначного вывода. Возможно, именно данный фактор определяет особенности, наблюдаемые на рис. 4, в области событий классов А0.1 и А1.0.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-72-10157).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. J. Aschwanden, *New Millennium Solar Physics*, (Springer, Switzerland, 2019). DOI:10.1007/978-3-030-13956-8
2. S. V. Berdyugina, *Living Reviews in Solar Physics* **2** (1), article id. 8 (2005). DOI:10.12942/lrsp-2005-8
3. S. A. Bogachev, *Geomagnetism and Aeronomy* **63** (4), 441 (2023). DOI:10.1134/S0016793223600261
4. P. L. Bornmann, D. Speich, J. Hirman, et al., *SPIE Conf. Proc.* **2812**, 291 (1996). DOI:10.1117/12.25407
5. P. C. Chamberlin, T. N. Woods, F. G. Eparvier, and A. R. Jones, *SPIE Conf. Proc.* **7438**, p. 743802 (2009). DOI:10.1117/12.826807
6. S. Christe, I. G. Hannah, S. Krucker, et al., *Astrophys. J.* **677** (2), 1385 (2008). DOI:10.1086/529011
7. S. Gburek, J. Sylwester, M. Kowalinski, et al., *Solar Phys.* **283** (2), 631 (2013). DOI:10.1007/s11207-012-0201-8
8. L. Golub, A. S. Krieger, J. K. Silk, et al., *Astrophys. J.* **189**, L93 (1974). DOI:10.1086/181472
9. M. Gryciuk, M. Siarkowski, J. Sylwester, et al., *Solar Phys.* **292** (6), article id. 77 (2017). DOI:10.1007/s11207-017-1101-8
10. I. G. Hannah, H. S. Hudson, M. Battaglia, et al., *Space Science Reviews* **159** (1-4), 263 (2011). DOI:10.1007/s11214-010-9705-4
11. D. H. Hathaway, *Living Reviews in Solar Physics* **12** (1), article id. 4 (2015). DOI:10.1007/lrsp-2015-4
12. D. H. Hathaway, R. M. Wilson, and E. J. Reichmann, *Solar Phys.* **211** (1), 357 (2002). DOI:10.1023/A:1022425402664
13. G. W. Henry, J. A. Eaton, J. Hamer, and D. S. Hall, *Astrophys. J. Suppl.* **97**, 513 (1995). DOI:10.1086/192149
14. J. L. Hodges, *Arkiv for Matematik* **3** (5), 469 (1958). DOI:10.1007/BF02589501
15. N. C. Joshi, N. S. Bankoti, S. Pande, et al., *New Astronomy* **15** (6), 538 (2010). DOI:10.1016/j.newast.2010.01.002
16. A. Kirichenko, I. Loboda, A. Reva, et al., *Solar-Terrestrial Physics* **9** (2), 3 (2023). DOI:10.12737/stp-92202301
17. A. S. Kirichenko and S. A. Bogachev, *Astronomy Letters* **39**, 797 (2013). DOI:10.1134/S1063773713110042
18. A. S. Kirichenko and S. A. Bogachev, *Astrophys. J.* **840** (1), article id. 45 (2017a). DOI:10.3847/1538-4357/aa6c2b
19. A. S. Kirichenko and S. A. Bogachev, *Solar Phys.* **292** (9), article id. 120 (2017b). DOI:10.1007/s11207-017-1146-8
20. Y. Kleorin, N. Safullin, N. Kleorin, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **460** (4), 3960 (2016). DOI:10.1093/mnras/stw1267
21. Y. D. Kotov, *Solar System Research* **45**, 93 (2011). DOI:10.1134/S0038094611020079

22. S. V. Kuzin, S. A. Bogachev, I. A. Zhitnik, et al., *Advances in Space Research* **43** (6), 1001 (2009). DOI:10.1016/j.asr.2008.10.021
23. S. V. Kuzin, I. A. Zhitnik, S. V. Shestov, et al., *Solar System Research* **45** (2), 162 (2011). DOI:10.1134/S0038094611020110
24. H. Lin, *Astrophys. J.* **446**, 421 (1995). DOI:10.1086/175800
25. D. Nandy and A. R. Choudhuri, *Science* **296** (5573), 1671 (2002). DOI:10.1126/science.1070955
26. K. K. Pandey, G. Yellaiah, and K. M. Hiremath, *Astrophys. and Space Sci.* **356** (2), 215 (2015). DOI:10.1007/s10509-014-2148-8
27. A. A. Pevtsov, G. H. Fisher, L. W. Acton, et al., *Astrophys. J.* **598**, 1387 (2003). DOI:10.1086/378944
28. V. B. Puzin, I. S. Savanov, E. S. Dmitrienko, et al., *Astrophysical Bulletin* **71** (2), 189 (2016). DOI:10.1134/S1990341316020061
29. A. Reva, S. Shestov, S. Bogachev, and S. Kuzin, *Solar Phys.* **276** (1-2), 97 (2012). DOI:10.1007/s11207-011-9883-6
30. A. A. Reva, A. S. Kirichenko, A. S. Ulyanov, and S. V. Kuzin, *Astrophys. J.* **851** (2), article id. 108 (2017). DOI:10.3847/1538-4357/aa9986
31. A. A. Reva, S. V. Kuzin, A. S. Kirichenko, et al., *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* **8**, id. 40 (2021). DOI:10.3389/fspas.2021.645062
32. C. J. Schrijver and M. L. De Rosa, *Solar Phys.* **212** (1), 165 (2003). DOI:10.1023/A:1022908504100
33. Y. Su, A. Van Ballegoijen, J. McCaughey, et al., *Astrophys. J.* **665**, 1448 (2007). DOI:10.1086/519679
34. A. S. Ulyanov, S. A. Bogachev, I. P. Loboda, et al., *Solar Phys.* **294** (9), article id. 128 (2019). DOI:10.1007/s11207-019-1472-0
35. P. Virtanen, R. Gommers, T. E. Oliphant, et al., *Nature Methods* **17**, 261 (2020). DOI:10.1038/s41592-019-0686-2
36. I. A. Zhitnik, O. I. Bugaenko, A. P. Ignat'ev, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **338** (1), 67 (2003). DOI:10.1046/j.1365-8711.2003.06014.x
37. G. Zhou, J. Wang, and Z. Cao, *Astron. and Astrophys.* **397**, 1057 (2003). DOI:10.1016/j.asr.2005.03.110

Changes in the Structure of the Sun's Activity Belts from Flares to Nanoflares

A. S. Kirichenko¹, A. A. Reva¹, S. A. Bogachev¹, and I. P. Loboda¹

¹Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia

Based on data from the “TESIS” scientific instrumentation aboard the “CORONAS–Photon” satellite, collected during the solar activity minimum of 2009, the positions on the disk of 1014 solar flares were analyzed, with X-ray classes ranging from A0.003 to C2.7. A change in the spatial distribution was found in the region of class A events. As flare power decreases, a transition is observed from their localization within the activity belts to a more uniform latitudinal distribution. An estimate of the asymmetry in the positioning of the events on the solar disk was also obtained—0.009. Thus, it was established that the number of flares in the southern and northern hemispheres is almost identical.

Keywords: *Sun: activity—Sun: flares*