УДК 523.98
DOI: 10.12737/szf-92202301

Поступила в редакцию 03.03.2023
Принята к публикации 18.04.2023

ШИРОТНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ МИКРОВСПЫШЕК И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ В МИНИМУМЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

LATITUDINAL DISTRIBUTION OF SOLAR MICROFLARES AND HIGH-TEMPERATURE PLASMA AT SOLAR MINIMUM

А.С. Кириченко
Институт космических исследований РАН, Москва, Россия, a.s.kiri4enko@gmail.com

И.П. Лобода
Институт космических исследований РАН, Москва, Россия, i.p.loboda@gmail.com

А.А. Рева
Институт космических исследований РАН, Москва, Россия, reva.antoine@gmail.com

А.С. Ульянов
Институт космических исследований РАН, Москва, Россия, ikiru@inbox.ru

С.А. Богачев
Институт космических исследований РАН, Москва, Россия, bogachev.sergey@gmail.com

A.S. Kirichenko
Space Research Institute RAS, Moscow, Russia, a.s.kiri4enko@gmail.com

I.P. Loboda
Space Research Institute RAS, Moscow, Russia, i.p.loboda@gmail.com

A.A. Reva
Space Research Institute RAS, Moscow, Russia, reva.antoine@gmail.com

A.S. Ulyanov
Space Research Institute RAS, Moscow, Russia, ikiru@inbox.ru

S.A. Bogachev
Space Research Institute RAS, Moscow, Russia, bogachev.sergey@gmail.com

Аннотация. В работе проанализировано распределение по широте высокотемпературной плазмы ($T > 4$ МК) и рентгеновских микровспышек на солнечном диске в период низкой активности Солнца в 2009 г. Распределение микровспышек классов A0.1–A1.0 содержит пояса, характерные для обычных вспышек класса B и выше. Всего нами зарегистрировано 526 микровспышек, большинство из которых, около 96 %, наблюдалось на высоких широтах. Около 4 % микровспышек было обнаружено около экватора. Мы полагаем, что они сформированы остаточным магнитным полем предыдущего, 23-го цикла активности. Обычные вспышки класса B и выше в этот период около экватора почти не наблюдались. Число микровспышек в южном полушарии в этот период было незначительно выше, чем в северном. Это отличается от распределения обычных вспышек, для которых ранее сообщалось о доминировании северного полушария по числу вспышек.

Ключевые слова: микровспышки, солнечный цикл, нагрев плазмы.

Abstract. The paper analyzes the latitudinal distribution of high-temperature plasma (T>4 MK) and microflares on the solar disk during low solar activity in 2009. The distribution of A0.1–A1.0 microflares contains belts typical of ordinary flares of B class and higher. In total, we have registered 526 flares, most of which, about 96 %, occurred at high latitudes. About 4 % of microflares were found near the solar equator. We believe that they were formed by the residual magnetic field of previous solar cycle 23. Ordinary flares were almost not observed near the equator during this period. The number of microflares in the southern hemisphere was slightly higher than in the northern one. This differs from the distribution of ordinary flares for which the northern hemisphere was previously reported to be dominant.

Keywords: microflares, solar cycle, plasma heating.

ВВЕДЕНИЕ

Пространственное распределение активных областей и рентгеновских вспышек (исключая микровспышки (энергия 10^{27}–10^{30} эрг) и нановспышки (энергия 10^{24}–10^{27} эрг)) на Солнце является существенно неоднородным. Преимущественно вспышки и группы солнечных пятен формируются в так называемых поясах активности, положение которых зависит от фазы солнечного цикла [Rao, 1974]. Пояса возникают в начале цикла на высоких широтах, после чего медленно смещаются в сторону экватора, что, при построении их зависимости от широты, образует общеизвестную диаграмму «бабочек» [Knoska, Krivsky, 1978].

Существует множество работ, посвященных изучению пространственного распределения вспышек, которые сходятся в том, что причиной особенностей их локализации является неоднородная структура магнитного поля Солнца. Так, в работе [Howard, 1974] был проанализирован период с 1967 по 1973 г. и показано, что 95 % магнитного потока в обоих полушариях Солнца находится в диапазоне широт от 0° до 40°. Абсолютное большинство солнечных вспышек регистрируется в пределах этого же широтного диапазона, вне зависимости от фазы цикла.

Ряд работ посвящен изучению асимметрии активности в южном и северном полушариях Солнца. Так, в работе [Bell, 1962] показано наличие долговременной асимметрии для солнечных циклов с номерами от 8 до 18. Было показано, что во время циклов 8, 9 и с 14 по 18 преобладала активность в северном полушарии — соответствующая доля пятен составляла от 50 до 60 %. Verma et al. [1987b] показали, что в 19-м и 20-м циклах на Солнце бóльшее число вспышек происходило в северном полушарии. В работе [Verma, Joshi, 1987a] продемонстрировано, что в 21-м цикле преобладала активность в южном полушарии. Yadav, Badruddin [1980] проанализировали широтное распределение оптических вспышек в южном и северном полушариях с 1957 по 1978 г. и показали, что 64 % всех вспышек произошло в северном полушарии и только 36 % в южном. При этом с 1957 по 1970 г. по числу оптических вспышек доминировало северное полушарие, а с 1970 по 1978 г. — южное, причем изменение пространственного распределения вспышек произошло не между двумя циклами, а непосредственно в ходе цикла. Garcia [1990], анализируя солнечные вспышки рентгеновского класса M1 и выше, показал, что в 20-м и 21-м циклах сначала более активным было северное полушарие, а затем активность сместилась в южное полушарие. В 22-м цикле, согласно работе [Li et al., 1998], доминировала активность в южном полушарии. Joshi et al. [2006], анализируя распределение хромосферных вспышек в линии Hα, показали, что в начале 23-го солнечного цикла основная часть вспышек регистрировалась в северном полушарии, а после прохождения максимума — уже в южном. Большое число вспышек класса C и выше с 1976 по 2008 г. было исследовано в работе [Pandey et al., 2015]. Авторами была подтверждена асимметрия солнечной активности с 21-го по 23-й солнечный цикл. Результаты перечисленных работ хорошо согласуются и показывают, что асимметрия рентгеновских вспышек с 21-го по 23-й цикл колебалась в диапазоне от –0.8 до 0.3. Полученные данные подтверждаются также анализом синоптических карт пятенной активности, проведенным в работе [Язев и др., 2021]. Joshi et al. [2010] проанализировали активность Солнца с 1976 по 2007 г. и показали, что наибольшая асимметрия пространственного расположения вспышек и пятен наблюдается в минимуме цикла.

Вопрос о пространственном распределении вспышек малых энергий является пока значительно менее изученным (см., например, обзор [Богачёв и др., 2020]). Большой массив вспышек низких рентгеновских классов от A до C (более 25000 событий) был изучен в работе [Christe et al., 2008] по данным рентгеновского телескопа RHESSI и рентгеновского монитора GOES. Авторами был сделан вывод, что в пространственном распределении исследованных событий наблюдаются пояса, как и в распределении обычных вспышек класса C и выше.

Reva et al. [2012] проанализировали 169 событий, которые определили как горячие рентгеновские точки (ГРТ). ГРТ являются короткоживущими (5–100 мин) высокотемпературными (5–50 МК) объектами, что отличает их, например, от ярких рентгеновских точек, время жизни которых может составлять 8–40 ч, а температура не превышает нескольких миллионов градусов. Для исследования использовались изображения Солнца в мягком рентгеновском диапазоне, полученные на космическом аппарате (КА) КОРОНАС-Ф (см. [Zhitnik et al., 2003]). Было показано [Reva et al., 2012], что основная часть ГРТ располагается в поясах активности, в отличие от ярких рентгеновских точек, имеющих равномерное пространственное распределение [Golub et al., 1974]. Незначительное количество ГРТ было обнаружено вблизи экватора.

В цикле работ [Боровик, Жданов, 2018, 2019, 2020] были изучены вспышечные события, которые могут рассматриваться как предельно мощные микровспышки, по данным в линии Hα. Было установлено, что на протяжении четырех циклов солнечной активности после 21-го цикла наблюдалось значительное уменьшение числа регистрируемых вспышечных событий в оптическом диапазоне. К сожалению, статистика по пространственному положению вспышек на солнечном диске в этих работах не приводится.

Кириченко и Богачёв (см., например, [Кириченко, Богачев, 2013; Kirichenko, Bogachev, 2017a, b] разработали методы для поиска и определения координат слабых вспышек (микровспышек) рентгеновского класса ниже A1.0. С помощью этих методов ими была обнаружена корреляция между мощностью микровспышек и характеристиками магнитного поля, при этом пространственное распределение микровспышек не изучалось.

В настоящей работе мы модифицируем методы из работ [Кириченко, Богачев, 2013; Kirichenko, Bogachev, 2017a, b] и применяем их для исследования пространственного распределения микровспышек рентгеновского класса A0.1 и выше, а также пространственного распределения формирующейся в них горячей плазмы. Мы хотим понять, сохраняются ли в этом диапазоне пояса активности, или вспышки распределены более равномерно. Мы предполагаем, что вспышки малых энергий должны иметь равномерное распределение. Такие события могут развиваться в компактных областях, характеризующихся слабым магнитным полем, условия для существования которых могут обеспечены на любых широтах. Однако вопрос о том, где происходит переход от поясов к равномерному распределению (в области микровспышек, нановспышек или пиковспышек (энергия 10^{21}–10^{24} эрг)) и происходит ли он вообще, пока однозначно не решен. Для исследования мы выбрали период низкой солнечной активности 2009 г., который сочли благоприятным для изучения вспышек малых энергий.

Структура работы следующая. В следующем разделе мы представляем краткое описание используемых данных и методов обработки. В разделе 2 представлены полученные результаты. В разделе 3 мы обсуждаем результаты работы и формулируем научные выводы.

1. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Для исследования мы использовали преимущественно данные приборов, работавших в 2009 г. на кос-

мическом аппарате «КОРОНАС-Фотон»: 1) солнечный телескоп FET; 2) изображающий спектрогелиометр MISH [Kuzin et al., 2009; Кузин и др., 2011]; 3) рентгеновский спектрофотометр SphinX [Gburek, 2013].

Координаты микровспышек определялись по данным прибора MISH, который регистрирует микрособытия по рентгеновскому излучению нагретой ими плазмы. Прибор является монохроматическим, т. е. регистрирует излучение в очень узком диапазоне длин волн, в котором находится всего одна сильная спектральная линия — дублет иона MgXII (длины волн 8.419 и 8.425 Å; см. описание прибора в [Reva et al., 2021]). Поскольку прибор имеет очень высокий порог температурной чувствительности (начинается от 3–4 млн. кельвинов), по его данным можно обнаруживать «горячие» микровспышки на фоне более холодной плазмы спокойной короны и активных областей. Пример изображения, полученного прибором MISH в исследуемый период, показан на правой панели рис. 1. На левой панели приведено близкое по времени изображение Солнца в более «холодной» спектральной области (171 Å; T~0.6 млн. кельвинов), полученное прибором FET.

Для определения рентгеновского класса микровспышек мы использовали данные спектрофотометра SphinX. Прибор регистрировал спектры мягкого рентгеновского излучения в диапазоне 1–15 кэВ, в том числе в области длин волн 1–8 Å, которая используется для рентгеновской классификации вспышек. Сведения о калибровке прибора SphinX, особенностях обработки временных профилей и методе определения рентгеновского класса вспышки можно найти в работе [Gryciuk et al., 2017]. Прибор SphinX обладал в диапазоне 1–8 Å чувствительностью, достаточной для регистрации вспышек рентгеновского класса A0.1 и выше. Необходимо также отметить низкий уровень фонового рентгеновского излучения Солнца в исследуемый период, который большую часть времени был ниже порога чувствительности мониторов GOES, что соответствует классу A1. Данный факт принципиально важен для корректной оценки мощности вспышек в случае использования аппаратуры, регистрирующей поток излучения от всего диска Солнца.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1. Пространственное распределение высокотемпературных источников излучения

Пространственное распределение всех найденных на изображениях MISH высокотемпературных источников излучения (11109 событий) приведено на рис. 2. На верхней панели показано распределение источников излучения по солнечному диску. Минимум солнечной активности между 23-м и 24-м солнечными циклами наблюдался приблизительно в декабре 2008 г. По этой причине в 2009 г. на Солнце одновременно присутствовали центры активности, связанные с завершающимся 23-м циклом, расположенные вблизи экватора, а также центры активности нового 24-го цикла, расположенные на высоких широтах. Высокоширотные источники излучения в северном и южном полушариях обозначены на верхней панели рис. 2 синим и красным цветами соответственно. Источники излучения вблизи экватора показаны белым цветом.

В целом распределение высокотемпературной плазмы показало хорошее согласие с ожидаемой структурой поясов активности в минимуме солнечного цикла.

На нижней панели рис. 2 этот же результат представлен в виде карты: распределение источников излучения вдоль широты и долготы. Цветовая шкала показывает количество источников, обнаруженных на соответствующих участках диска Солнца. Так же, как и на верхней панели, хорошо видна структура распределения в виде трех полос: два пояса на высоких широтах и одна группа вблизи экватора. Долгота 0° соответствует центральному меридиану Солнца при наблюдениях с Земли. Долготы –90° и +90° соответствуют восточному и западному краям солнечного диска. Мы не определяли абсолютную (кэррингтоновскую) долготу источников излучения, поскольку не ставили целью исследовать распределение по долготе.

2.2. Пространственное распределение микровспышек

Пространственное распределение микровспышек, т. е. источников излучения, для которых был достоверно измерен профиль излучения и определен рентгеновский класс (526 событий), приведено на рис. 3.

Как и для высокотемпературных источников излучения (рис. 2), на рис. 3 видны три группы: два пояса на высоких широтах (синий — в северном полушарии; красный — в южном) и одна группа вблизи экватора (белый цвет). Зеленым цветом показаны вспышки из каталога GOES, координаты которых определялись не по данным прибора MISH, а брались из каталога NOAA.

По оси X показаны рентгеновский класс вспышки (A, B, C) и интенсивность потока излучения в диапазоне 1–8 Å (Вт м$^{-2}$). Вспышки, найденные по данным GOES, имеют класс примерно B и выше. Вспышки, найденные по данным MISH и SphinX, имеют класс от A0.1 и выше.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Солнечный минимум характеризуется благоприятными условиями для наблюдения вспышек малых энергий. В 2009 г. на орбите Земли работал КА «КОРОНАС-Фотон», предоставивший значительный объем данных о солнечной активности в этот период. В настоящем исследовании мы использовали эти данные для анализа пространственного распределения вспышек низких энергий и высокотемпературных источников излучения.

По результатам обработки данных мы нашли значительное число высокотемпературных источников излучения (11109), для которых удалось определить их положение на диске Солнца. К сожалению, только для незначительной части этих источников удалось достоверно измерить профиль излучения, а также измерить рентгеновский класс. Это связано прежде всего со сложностью выделения слабых

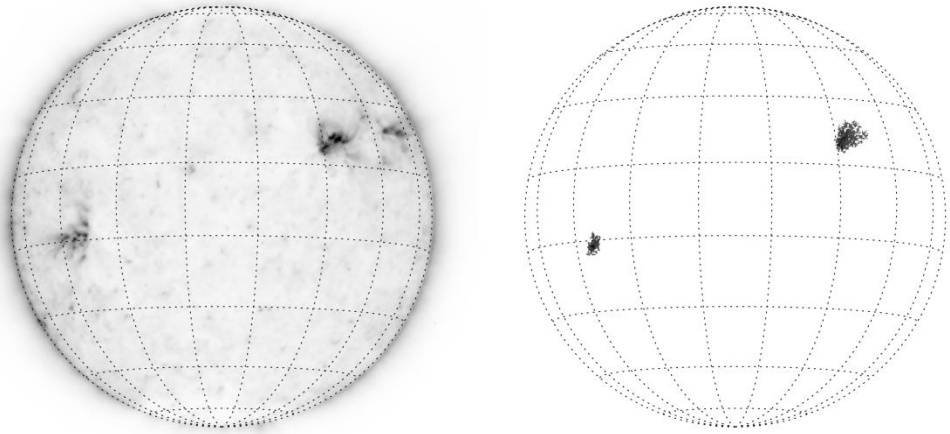

Рис. 1. Примеры изображений Солнца, использовавшихся в работе: слева — изображение Солнца, полученное телескопом FET в линии 171 Å; справа — близкое по времени изображение, полученное спектрогелиометром MISH в линии 8.42 Å

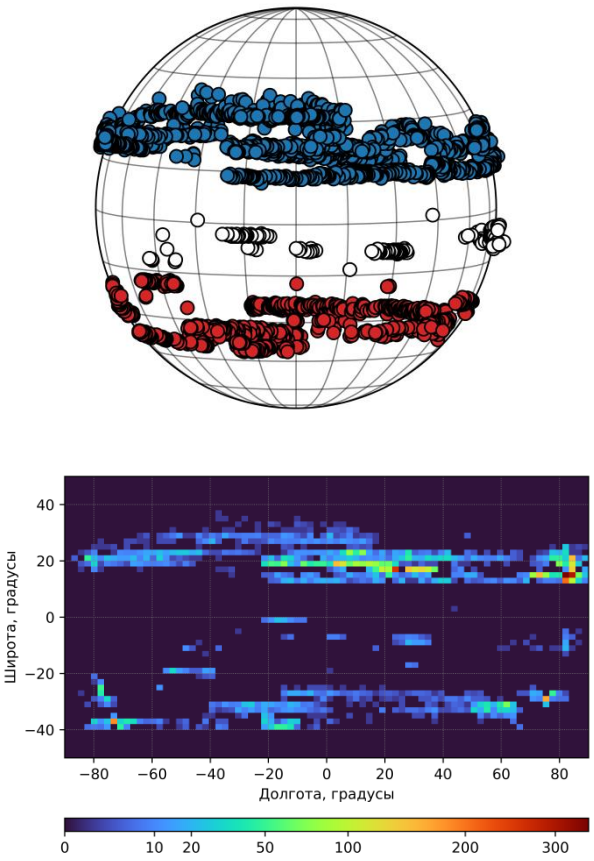

Рис. 2. Пространственное распределение высокотемпературных (T>4 МК) источников излучения на диске Солнца в 2009 г. (минимум солнечной активности) по данным КА «КОРОНАС-Фотон»

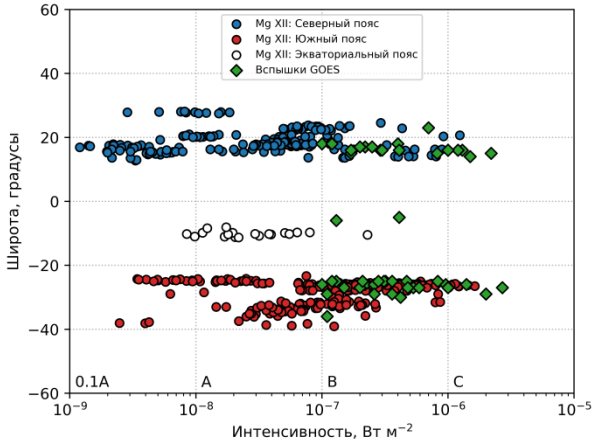

Рис. 3. Распределение по широте солнечных микровспышек в 2009 г. (минимум солнечной активности) по данным КА «КОРОНАС-Фотон» и GOES

всплесков излучения на фоне шума. В частности, рентгеновские детекторы, работавшие в тот период на КА GOES, достоверно регистрировали лишь вспышки класса B и выше. Кроме того, часть данных прибора SphinX, который мы использовали в работе, была потеряна из-за нахождения КА «КОРОНАС-Фотон» в радиационных поясах. Всего мы определили координаты для 475 микровспышек рентгеновского класса A0.1 и выше по данным приборов MISH и SphinX и еще для 51 вспышки класса B и выше по данным КА GOES.

Распределения вспышек и высокотемпературной плазмы по широте (см. рис. 2 и 3) оказались в хорошем согласии с ожидаемым распределением, которое следует из закона Шперера. На рис. 4 показана диаграмма «бабочек» для периода с 1996 по 2020 г. Согласно этим данным, в 2009 г. должно было наблюдаться три группы вспышек: две на высоких широтах в северном и южном полушариях и одна вблизи экватора. Оба полученных нами распределения (и для высокотемпературной плазмы и для микровспышек) примерно соответствуют этому шаблону.

Было затруднительно сделать достоверные выводы о распределении вспышек в исследуемый период только по данным КА GOES, поскольку в соответствующем каталоге было найдено всего 51 событие класса B и выше с известными координатами. Полу-

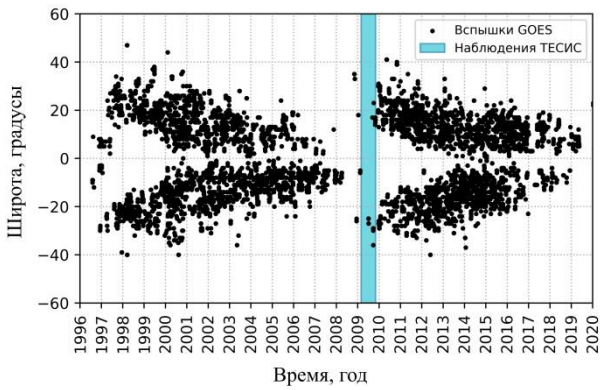

Рис. 4. Распределение солнечных вспышек класса B и выше по широте в 23-м и 24-м солнечных циклах по данным каталогов GOES и NOAA. Показан период, рассматриваемый в работе (наблюдения ТЕСИС)

ченные в настоящей работе выводы удалось сделать только благодаря привлечению данных MISH и SphinX о вспышках класса A0.1 и выше.

Заметим также, что почти невозможно, используя только данные GOES, отделить высокоширотные пояса вспышек от области около экватора. Например, в работе [Abdel-Sattar et al., 2018] не удалось выделить участок распределения около экватора: эта группа оказалась смешана с крыльями южного и северного поясов. В нашем случае из всех вспышек, зарегистрированных GOES, достоверно к экваториальной области удалось отнести только два события. Все остальные вспышки этой группы были обнаружены по данным SphinX и MISH. События экваториальной группы составили 4.2 % от общего числа вспышек.

Распределение вспышек в поясах не является симметричным и не может быть аппроксимировано простой функцией, например распределением Гаусса. На рис. 5 показано фактическое распределение по широте высокотемпературных источников излучения (верхняя панель) и микровспышек (нижняя панель). Красная кривая на рисунке — результат аппроксимации распределения суммой функции Гаусса и полинома второй степени. Видно, что внутренние и внешние части распределения и в северном, и в южном полушариях имеют различную дисперсию, но мы не изучали этот вопрос более подробно.

Некоторые статистические сведения о распределениях вспышек и высокотемпературной плазмы приведены в табл. 1. Информация приведена только для высокоширотных поясов: северного и южного. Экваториальное распределение не представлено, поскольку из-за малого числа событий статистические выводы в его отношении недостоверны.

На распределениях на рис. 5 наблюдается асимметрия числа событий в северном и южном полушариях. Для ее количественной оценки мы использовали формулу:

$$A = \frac{N - S}{N + S},$$

где N — число событий в северном полушарии, а S — в южном. $A > 0$ соответствует случаю, когда наибольшее число событий зарегистрировано в северном полушарии; $A < 0$ — в южном. Результаты приведены в табл. 2.

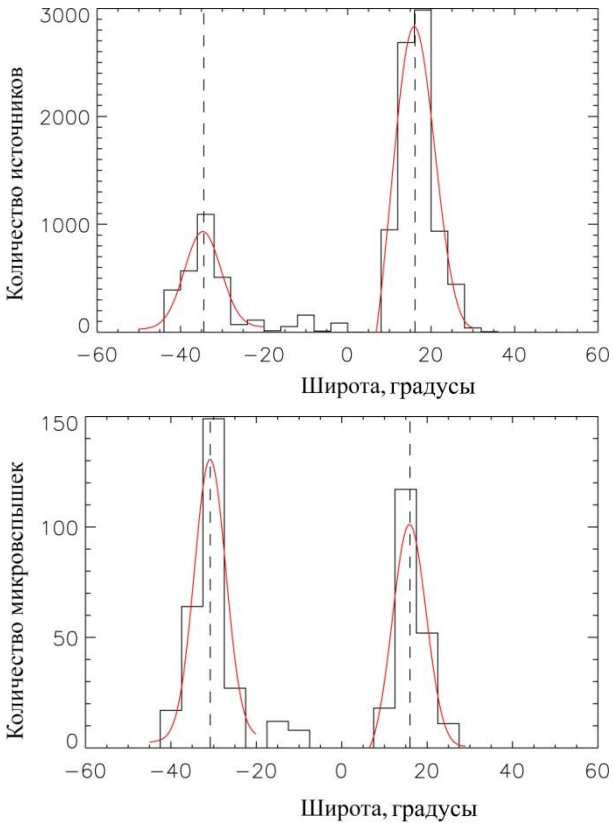

Рис. 5. Фактическое распределение по широте высокотемпературных источников излучения (верхняя панель) и микровспышек (нижняя панель). Красная кривая — результат аппроксимации

Полученные результаты несколько противоречивы, так как приводят к разным выводам для высокотемпературной плазмы и микровспышек. В первом случае существенно доминировало по числу событий северное полушарие, а во втором случае — незначительно южное. Такое различие может быть объяснено возможностью формирования горячей плазмы в короне не только во вспышках, но и в результате медленного энерговыделения в активных областях (см., например, [Гречнев и др., 2006; Урнов и др., 2007]). Заметим, что в работе [Abdel-Sattar et al., 2018] для более длительного периода с 2008 по 2012 г., который включал исследованный нами 2009 г., для вспышек была обнаружена асимметрия с преобладанием активности в северном полушарии (5861 событий в южном полушарии против 10407).

Заметим, что на рис. 3 наблюдается увеличение ширины пояса в области слабых микровспышек (рентгеновский класс ниже A1.0) по сравнению со вспышками класса B и выше. Иными словами, есть признаки увеличения широтного диапазона, в пределах которого регистрируются вспышечные события, по мере уменьшения их мощности. Мы считаем это интересным, поскольку полагаем, что при переходе к вспышкам самых низких энергий (нановспышкам и, возможно, пиковспышкам) распределение по широте должно становиться более равномерным (см., например, новые результаты по нановспышкам в работах [Завершинский и др., 2022; Богачёв, Ерхова, 2023]). Возможно, что мы наблюдаем на рисунке признаки именно такого перехода. Впрочем, точность полученных нами данных пока недостаточна для достовер-

Таблица 1

Характеристики распределений по широте высокотемпературных источников излучения и микровспышек

Выборка	Группа	Средняя широта, град	Диапазон широт, град
Высокотемпературная плазма	Северная	18.6°±3.9°	от 12° до 36.4°
	Южная	–32.4°±4.4°	от –39.7° до –17.2°
Микровспышки	Северная	18.5°±3.4°	от 12.8° до 28.1°
	Южная	–28.3°±3.7°	от –39.1° до –23.3°

Таблица 2

Асимметрия распределений в северном и южном полушариях в исследуемый период

Выборка	Значение асимметрии
Высокотемпературная плазма	0.49
Микровспышки	–0.13

ного вывода в этой области ввиду малой статистики, а также отсутствия данных для событий, класс которых ниже A0.1.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 21-72-10157).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Богачёв С.А., Ерхова Н.Ф. Измерение энергетического распределения нановспышек малой мощности. *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9, № 1. С. 3–9. DOI: 10.12737/szf-91202301.

Богачёв С.А., Ульянов А.С., Кириченко А.С. и др. Микровспышки и нановспышки в короне Солнца. *Успехи физических наук*. 2020. Т. 190, № 8. С. 838–858. DOI: 10.3367/UFNr.2019.06.038769.

Боровик А.В., Жданов А.А. Статистические исследования продолжительности солнечных вспышек малой мощности. *Солнечно-земная физика*. 2018. Т. 4, № 2. С. 35–46. DOI: 10.12737/szf-42201803.

Боровик А.В., Жданов А.А. Процессы энерговыделения в солнечных вспышках малой мощности. *Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 5, № 4. С. 3–11. DOI: 10.12737/szf-54201901.

Боровик А.В., Жданов А.А. Солнечные вспышки малой мощности в оптическом и рентгеновском диапазонах длин волн в 21–24-м солнечных циклах. *Солнечно-земная физика*. 2020. Т. 6, № 3. С. 18–25. DOI: 10.12737/szf-63202002.

Гречнев В.В., Кузин С.В., Урнов А.М., Житник И.А., Уралов А.М., Богачев С.А. и др. О долгоживущих горячих корональных структурах, наблюдавшихся на ИСЗ КОРОНАС-Ф/СПИРИТ в линии Mg XII. *Астрономический вестник. Исследования солнечной системы*. 2006. Т. 40, № 4. С. 314–322.

Завершинский Д.И., Богачёв С.А., Белов С.А., Леденцов Л.С. Метод поиска нановспышек и их пространственное распределение в короне Солнца. *Письма в Астрон. журн*. 2022. Т. 48, № 9. С. 665–675. DOI: 10.31857/S0320010822090091.

Кириченко А.С., Богачев С.А. Длительный нагрев плазмы в солнечных микровспышках рентгеновского класса A1. 0 и ниже. *Письма в Астрон. журн*. 2013. Т. 39, № 11. С. 884–884. DOI: 10.7868/S0320010813110041.

Кузин С.В., Житник И.А., Шестов С.В. и др. Эксперимент ТЕСИС космического аппарата КОРОНАС-Фотон. *Астрономический вестник. Исследования солнечной системы*. 2011. Т. 45, № 2. С. 166–177.

Урнов А.М., Шестов С.В., Богачев С.А. и др. О пространственно-временных характеристиках и механизмах образования мягкого рентгеновского излучения в солнечной короне. *Письма в Астрон. журн*. 2007. Т. 33, № 6. С. 446–462. DOI: 10.7868/S0320010813110041.

Язев С.А., Ульянова М.М., Исаева Е.С. Комплексы активности на Солнце в 21 цикле солнечной активности. *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 4. С. 3–9. DOI: 10.12737/szf-74202101.

Abdel-Sattar W., Mawad R., Moussas X. Study of solar flares' latitudinal distribution during the solar period 2002–2017: GOES and RHESSI data comparison. *Adv. Space Res*. 2018. Vol. 62, no. 9. P. 2701–2707. DOI: 10.1016/j.asr.2018.07.024.

Bell B. A Long-term north-south asymmetry in the location of solar sources of great geomagnetic storms. *Smithsonian Contr. Astrophys.* 1962. Vol. 5. P. 203.

Christe S., Hannah I.G., Krucker S., et al. RHESSI microflare statistics. I. Flare-finding and frequency distributions. *Astrophys. J.* 2008. Vol. 677, no. 2, P. 1385. DOI: 10.1086/529011.

Garcia H.A. Evidence for solar-cycle evolution of north-south flare asymmetry during solar cycle 20 and 21. *Solar Phys*. 1990. Vol. 127. P. 185. DOI: 10.1007/BF00158522.

Gburek S., Sylwester J., Kowalinski M., et al. SphinX: The Solar Photometer in X-rays. *Solar Phys.* 2013. Vol. 283. P. 631–649. DOI: 10.1007/s11207-012-0201-8.

Golub L., Krieger A.S., Silk J.K., et al. Solar X-ray bright points. *Astrophys. J. Lett.* 1974. Vol. 189. P. L93. DOI: 10.1086/181472.

Gryciuk M., Siarkowski M., Sylwester J., et al. Flare Characteristics from X-ray Light Curves. *Solar Phys*. 2017. Vol. 292, 77. DOI: 10.1007/s11207-017-1101-8.

Howard R. Studies of Solar Magnetic Fields. II: The Magnetic Fluxes. *Solar Phys.* 1974. Vol. 38. P. 59–67. DOI: 10.1007/BF00161823.

Joshi B., Pant P., Manoharan P.K. North-South distribution of solar flares during cycle 23. *J. Astrophys. Astron*. 2006. Vol. 27. P. 151–157. DOI: 10.1007/BF02702517.

Joshi N.C., Bankoti N.S., Pande S., et al. Statistical analysis of soft X-ray solar flares during solar cycles 21, 22 and 23. *New Astron.* 2010. Vol. 15. P. 538–546. DOI: 10.1016/j.newast.2010.01.002.

Kirichenko A.S., Bogachev S.A. Plasma heating in solar microflares: Statistics and analysis. *Astrophys. J*. 2017a. Vol. 840, no. 1. P. 45–52. DOI: 10.3847/1538-4357/aa6c2b.

Kirichenko A.S., Bogachev S.A. The relation between magnetic fields and X-ray emission for solar microflares and active regions. *Solar Phys*. 2017b. Vol. 292. P. 120–134. DOI: 10.1007/s11207-017-1146-8.

Knoska S., Krivsky L. Time-latitude occurence of flares in solar cycle No 20 (1965–1976). *Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia*. 1978. Vol. 29. P. 352.

Kuzin S.V., Bogachev S.A., Zhitnik I.A., Pertsov A.A., et al. TESIS experiment on EUV imaging spectroscopy of the Sun. *Adv. Space Res.* 2009. Vol. 43, no. 6. P. 1001–1006. DOI: 10.1016/j.asr.2008.10.021.

Li K.J., Schmieder B., Li Q.Sh. Statistical analysis of the X-ray flares (M > = 1) during the maximum period of solar cycle 22. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1998. Vol. 131. P. 99–104. DOI: 10.1051/aas:1998254.

Pandey K.K., Yellaiah G., Hiremath K.M. Latitudinal distribution of soft X-ray flares and dispairty in butterfly diagram. *Astrophys. Space Sci*. 2015. Vol. 356. P. 215–224. DOI: 10.1007/s10509-014-2148-8.

Rao K.R. Latitudinal distributions of solar optical flares. *International Symposium on Solar-Terrestrial Physics, Sao Paulo, Brazil, Proceedings.* 1974. Vol. 1. P. 4–15.

Reva A., Shestov S., Bogachev S., Kuzin S. Investigation of Hot X-Ray Points (HXPs) using spectroheliograph Mg XII experiment data from CORONAS-F/SPIRIT. *Solar Phys.* 2012. Vol. 276. P. 97–112. DOI: 10.1007/s11207-011-9883-6.

Reva A.A., Kuzin S.V., Kirichenko A.S., et al. Monochromatic X-ray imagers of the Sun based on the Bragg crystal optics. *Front. Astron. Space Sci.* 2021. Vol. 8. DOI: 10.3389/fspas.2021.645062.

Verma V.K., Joshi G.C. On the periodicities of sunspots and solar strong hard X-ray bursts. *Solar Phys.* 1987a. Vol. 114. P. 415–418. DOI: 10.1007/BF00167358.

Verma V.K., Pande M.C., Wahab U. Energetic flare zones on the Sun. *Solar Phys.* 1987b. Vol. 112. P. 341–346. DOI: 10.1007/BF00148788.

Yadav R.S., Badruddin K.S. Solar latitudinal distribution of solar flares of different importances around the Sun. *Indian J. Radio Space Phys*. 1980. Vol. 9. P. 155.

Zhitnik I., Kuzin S., Afanas'ev A., et al. XUV observations of solar corona in the SPIRIT experiment on board the CORONAS-F satellite. *Adv. Space Res.* 2003. Vol. 32. P. 473–477. DOI: 10.1016/S0273-1177(03)00351-X.

Как цитировать эту статью:

Кириченко А.С., Лобода И.П., Рева А.А., Ульянов А.С., Богачёв С.А. Широтные распределения солнечных микровспышек и высокотемпературной плазмы в минимуме солнечной активности. *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9, № 2. С. 5–11. DOI: 10.12737/ szf-92202301.