

РЕНТГЕНОВСКИЕ ВСПЫШКИ И КОМПЛЕКСЫ АКТИВНОСТИ НА СОЛНЦЕ В 24 ЦИКЛЕ

© 2020 г. Е. С. Исаева^{1, 2}, В. М. Томозов², С. А. Язев^{1, 2, *}

¹ Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

² Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

*E-mail: syazev@gmail.com

Поступила в редакцию 13.05.2019 г.

После доработки 28.08.2019 г.

Принята к публикации 06.09.2019 г.

Проанализирована статистическая связь комплексов активности (КА) на Солнце и солнечных вспышек с рентгеновскими классами GOES выше M1.0 (744 события) в течение 24 цикла солнечной активности (до января 2019 г.). Все группы пятен разбиты на три класса: в ядрах КА, в ветвях КА, за пределами КА. Показано, что 78% вспышек указанных классов происходят преимущественно в группах пятен, расположенных в ядрах и в ветвях КА. Удельное число вспышек в ядрах КА в 2.5 раза превышает соответствующий параметр в ветвях КА и за пределами КА. С КА связаны 87% LDE-вспышек указанных классов, 82% всех сильных протонных вспышек, генерирующих потоки энергичных протонов на орбите Земли, а также 74% всех гамма-вспышек в 24 цикле.

DOI: 10.31857/S000462992001003X

1. ВВЕДЕНИЕ

Солнечные вспышки были и остаются важным объектом исследования из-за их высокой геоэффективности вследствие воздействия на околоземную среду высокоэнергичных ускоренных частиц и корональных выбросов масс. В наших предыдущих работах была показана тесная связь вспышек с комплексами активности (КА) на Солнце. Следует напомнить, что в соответствии с используемым определением КА представляют собой долгоживущие (не менее трех кэррингтоновских оборотов подряд) структуры магнитных полей, для которых характерно постоянное расположение групп пятен в кэррингтоновской системе координат [1]. Такие участки солнечной поверхности называются ядрами КА. В некоторых случаях рядом с ядрами (менее чем в 30 гелиографических градусов) наблюдаются группы пятен (активные области, далее АО), физически (через системы корональных петель) связанные с ядрами КА. Такие АО в рамках описываемого подхода называются ветвями КА. Различия между ядрами и ветвями КА заключаются в том, что пятна в ядре КА наблюдаются на протяжении не менее чем трех оборотов Солнца подряд, в то время как ветвь КА — это, как правило, АО, которая существует в пределах одного оборота. Кроме того, АО, образующая ветвь КА, подвержена дифференциальному вращению, вращаясь с типичной для своей широты скоростью, тогда как АО в

ядре КА всегда вращаются с кэррингтоновской скоростью [2]. Все прочие АО, возникающие вне ядер и ветвей КА, могут быть условно отнесены к спорадической компоненте активности пятен.

В ряде работ было показано, что КА являются преимущественными местами возникновения, как минимум, сильных солнечных вспышек. В работе [3] показано, что в 21–23 циклах около 80% всех протонных вспышек, воздействующих на природную среду из каталога [4], происходили в ядрах, либо в ветвях КА на одном из этапов их развития. Таким образом, КА — это сложные эволюционирующие магнитные структуры на Солнце, требующие первостепенного изучения при решении задачи прогноза солнечных вспышек.

Настоящая работа посвящена статистике солнечных вспышек различных классов, имеющих отношение к КА. Если в работе [1] рассматривались закономерности возникновения только протонных вспышек из каталога [4], то здесь анализу подверглись все рентгеновские вспышки классов выше чем M1.0, происшедшие в течение текущего 24 цикла солнечной активности в период с января 2009 по декабрь 2018 г. включительно. Кроме того, отдельно рассмотрены вспышки с продолжительным гамма-излучением.

Таблица 1. Значения индекса мощности ядер КА

Баллы	Описание пятен в ядре КА	Аналог цюрихской классификации групп пятен
0.5	Одна либо две группы пор без биполярной структуры	A, B либо A + A
1	Одна группа пятен, включающая пятно с полутенью либо три группы пор	C либо A + A + A либо B + B
1.5	Группа пятен с двумя и более пятнами с полутенью, либо с одним крупным пятном, или две небольшие группы	C + (A или B) или E или C + C или J или H
2	Крупная группа с большим числом пятен и пор, в том числе с большими пятнами, либо две группы пятен	E + (B или C) или G + (B или C)
2.5	Большая группа пятен (площадь более 1000 мдп), протяженность более 20°, либо две крупные группы пятен	F или E + D
3	Экстремально крупная группа пятен (площадь более 2000 мдп.), либо крупная группа пятен с группами-спутниками рядом с ней	F > 20°

2. АКТИВНЫЕ ОБЛАСТИ В 24 ЦИКЛЕ

Поскольку подавляющее большинство вспышек происходит в АО, рассмотрим статистику образования пятен в 24 цикле. Всего за период от начала 24 цикла (2078 оборот, январь 2009 г.) до конца 2211 оборота (декабрь 2018 г.) на видимом полушарии Солнца отмечено 1720 групп пятен (последняя из них имела номер 12731 по классификации NOAA). С помощью методики площадок длительной активности [5], из их числа были выделены АО, развивавшиеся в ядрах и ветвях КА. Эти АО были занесены в каталог КА [6], описание каталога приведено в работе [7].

Для описания КА удобно использовать специальные индексы – число ядер КА в данном обороте *n* и суммарная мощность ядер КА в данном обороте *P* (степень запятненности по 6-балльной шкале). Эти индексы, предложенные Баниным [8], были впоследствии модифицированы [2]. Индекс *P* приписывается каждой АО во время ее максимального развития. Описание шкалы значений индекса *P* приведено в табл. 1. [2, 9]

Для изучения свойств активности пятен, включая КА, были построены синоптические карты для каждого кэррингтоновского оборота 24 цикла, начиная с 2009 по 2213 обороты. На карты были нанесены группы пятен в состоянии, близком к фазе максимального развития по данным собственных наблюдений фотосферы Солнца в астрономической обсерватории Иркутского государственного университета (ИГУ), дополненным наблюдениями космической обсерватории SDO. С использованием синоптических карт и методики площадок длительной активности [1, 2, 8] были выделены ядра и ветви КА и определены значения максимальной мощности ядер КА *P* для каждого ядра КА в каждом кэррингтоновском обороте. Для каждого оборота определено также число ядер КА *n*. Эти параметры занесены в ката-

лог, на основе которого была создана специальная база данных [10].

Систематизация данных позволила выделить следующие характеристики развития КА в 24 цикле. Первый КА 24 цикла появился в декабре 2009 г. (оборот 2091), последний исчез в июне 2018 г. (оборот 2205). Всего в 24 цикле на видимом полушарии Солнца выделены 706 АО, развивавшихся в ядрах КА (41% от общего числа), в том числе 363 в северном и 343 в южном полушарии. Количество АО, причисленных к ветвям КА, составило соответственно 179 и 150 в северном и южном полушариях Солнца, всего 329 (19.1%) от общего числа АО в цикле. Таким образом, всего в ядрах и ветвях КА наблюдались 1035 АО (60.2% от общего числа за рассматриваемый период). Вне КА развивались 685 АО (39.8%).

В каталоге КА описаны 64 ядра КА в северном полушарии и 50 ядер КА в южном, всего 114 ядер КА за рассматриваемый период. Таким образом, в северном полушарии активность комплексов КА была выше, чем в южном полушарии. Первое ядро КА северного полушария возникло в 2091 обороте, последнее – исчезло в 2205 обороте. В южном полушарии первое ядро КА появилось в 2099 обороте (более чем на полгода позже, чем в северном), последнее исчезло в 2197 обороте (на полгода раньше, чем в северном). Таким образом, цикл развития ядер КА в южном полушарии Солнца оказался на год короче, чем в северном полушарии.

Имеет смысл провести сравнение параметров КА с аналогичными данными в предыдущих циклах. Они приведены в табл. 2 и 3. Из табл. 2 следует, как минимум, наличие ярко выраженной северно-южной асимметрии в течение последних циклов – доминирование активности КА в южном полушарии в 23 цикле и преобладание ее в северном полушарии – в 24 цикле (в отличие от

Таблица 2. Ядра КА в 22–24 циклах

Номер цикла	Северное полушарие	Южное полушарие	Всего
22	52	52	104
23	69	77	146
24	64	50	114

симметрии, характерной для 22 цикла). Заметим, что нарастающая от 23 к 24 циклу асимметрия отмечалась многими авторами и для других параметров циклов. Что касается флуктуаций общего числа ядер КА от цикла к циклу, то предположительно так проявляется в индексах КА правило Гневывшева–Оля (чередование более и менее высокого уровня активности в четных и нечетных циклах [11, с. 48]). Впрочем, при столь малой статистике (три цикла) сложно уверенно говорить о каких-либо закономерностях.

На рис. 2 показано, как менялось со временем (N_T – кэррингтоновские обороты) количество ядер комплексов КА в ходе 24 цикла активности отдельно для северного N_p и для южного N_s полушарий Солнца. Ядрам КА южного полушария для наглядности графика приписаны отрицательные значения.

Рисунок демонстрирует существенную северно-южную асимметрию развития ядер КА в 24 цикле. Максимум числа КА в северном полушарии отмечен в 2012 г., после чего на протяжении практически пяти лет число северных ядер КА флуктуировало около среднего значения 2–3 объекта в обороте. В отличие от северного полушария, число ядер КА в южном полушарии квазициклически нарастало от начала цикла, достигнув ярко выраженного максимума в 2014 г., после чего последовал сравнительно резкий спад числа ядер КА. Указанная асимметрия хорошо просматривается в 24 цикле и во временном ходе индекса чисел Вольфа W , что подтверждает высокую корреляцию (0.85) между индексом W и индексом КА n и P , отмеченную в работе [12].

Обратимся к табл. 3. Общее число оборотов в цикле приведено в столбце 2; число оборотов, в которых наблюдалось хотя бы одно ядро КА, ука-

зано в столбце 3. Значения средней удельной мощности ядра КА (суммарной мощности ядер КА в данном обороте, отнесенной к числу n ядер КА в этом обороте) оказались близкими: в 22-м цикле – 1.11, в 23 цикле – 1.09, в 24 цикле – 1.06. Заметна тенденция к постепенному уменьшению удельной мощности ядер КА от цикла к циклу. При расчете значений этого параметра учитывались только те обороты, в которых на солнечном диске наблюдались ядра КА. Так было далеко не всегда: в 22 обороте отмечено 29 “нулевых” в указанном смысле оборотов из 130, в 23 – 44 из 168. В 24 цикле по состоянию на февраль 2019 г. (2213 оборот) КА отсутствовали в 29 оборотах из 135 (цикл еще не закончился, и, по-видимому, число “нулевых” оборотов в завершающемся 24 цикле превысит 40, согласно нашему прогнозу). В начале цикла количество “нулевых” (без ядер КА) оборотов составило соответственно 6 в 22 цикле, 14 в 23 цикле, и 13 в начале 24 цикла. Таким образом, по сравнению с 22 циклом, КА в 23 и 24 циклах начали появляться с заметной задержкой по отношению к моменту начала цикла, определяемому по сглаженной кривой среднемесячных значений чисел Вольфа [11, с. 41].

На рис. 3 приведено распределение ядер КА в 24 цикле по продолжительности существования.

Согласно применяемому определению КА [1, 2], ядер КА, существующих на протяжении одного или двух кэррингтоновских оборотов, не зарегистрировано. Основная часть ядер КА существует на протяжении 3–6 оборотов. Немногочисленным более длительным случаям соответствует длинный плоский “хвост” распределения.

3. РЕНТГЕНОВСКИЕ ВСПЫШКИ В 24 ЦИКЛЕ

По открытым данным о солнечных вспышках, регистрируемых спутниками GOES, выполнен статистический анализ вспышечной активности в 24 цикле, включая оценку вклада КА в общий ход вспышечной активности. Рассматривались только вспышки рентгеновских баллов начиная с M1.0.

Всего в рассматриваемый период 24 цикла были зафиксированы 744 вспышки МХ-классов, в

Таблица 3. Параметры ядер КА в 22–24 циклах солнечной активности

№ цикла	Число анализируемых оборотов цикла	Число оборотов с ядрами КА	Среднее число ядер КА в обороте	Средняя удельная мощность ядра КА в обороте	Суммарная мощность ядер КА за цикл	Средняя мощность ядер КА в обороте
22	130	101	4.31	1.11	613	6.07
23	168	124	4.49	1.09	866	6.98
24	135*	104	5.27	1.06	580	5.57

* до 2213 оборота включительно

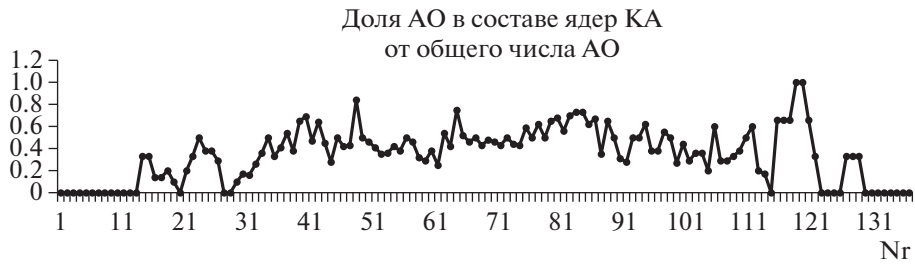


Рис. 1. Отношение числа АО в составе ядер КА к полному числу АО в 24 цикле. По оси абсцисс отложено время в кэррингтоновских оборотах Nr, начиная от начала цикла.

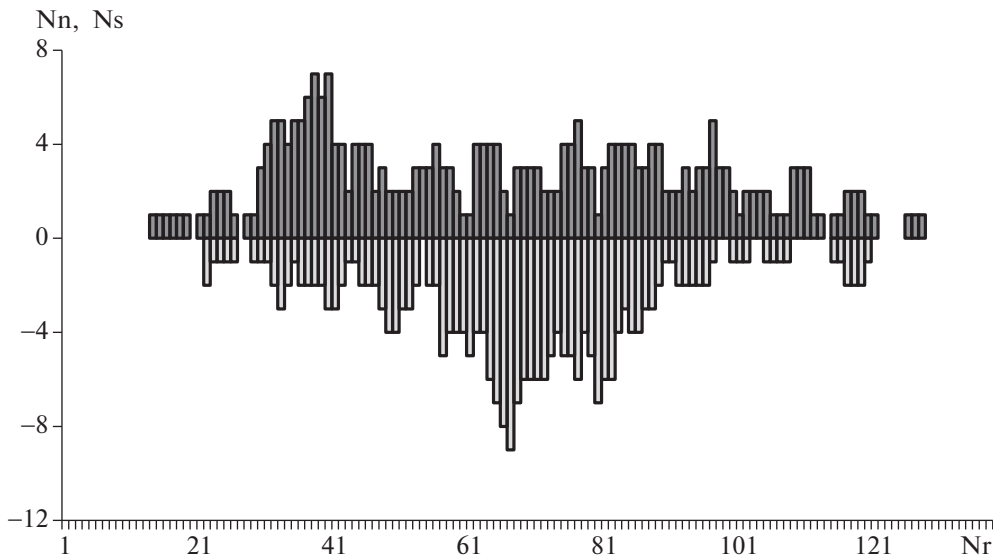


Рис. 2. Количество ядер КА в 24 цикле. Nn — число ядер КА в северном полушарии (сверху), Ns — число ядер КА в южном полушарии (снизу), пояснения в тексте.

том числе 310 в северном полушарии и 434 в южном (южное полушарие оказалось значительно более активным по количеству произведенных вспышек). Вспышечно-активными оказались 234 из 1720 АО (13.6%). Таким образом, более 86% всех АО, наблюдавшихся на видимом диске Солнца в 24 цикле, генерировали либо слабые

вспышки рентгеновского С-класса, не рассматриваемые в данной работе, либо вообще не производили никаких вспышек.

Вклад АО, находящихся в составе КА, в процесс генерации вспышек составил 78.2% (в КА произошли 582 вспышки из 744), в том числе 490 в ядрах КА и 92 в ветвях КА. 162 вспышки (11.8%) произвели АО, не имеющие отношения к КА.

Средняя вспышечная продуктивность групп пятен, находящихся в ядрах КА (количество вспышек в ядрах КА, отнесенное к общему числу АО в ядрах КА), составила 0.69. В ветвях КА этот показатель оказался существенно ниже (0.28), в АО вне КА — еще ниже (0.24).

Как известно (например, см. [13]), с 1976 г. в качестве индекса, отражающего уровень солнечного рентгеновского излучения, используется фоновое значение потока мягкого рентгеновского излучения Солнца в диапазоне 0.1–0.8 нм (12.5 эВ–1 кэВ) по данным спутников серии

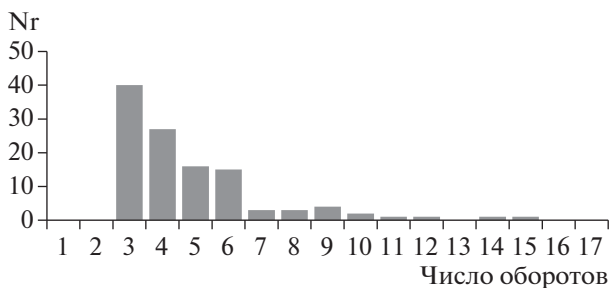


Рис. 3. Распределение ядер КА в 24 цикле по продолжительности жизни.

Таблица 4. Вспышечная активность в 24 цикле

	Общее число АО N	Число вспышечных АО Nf	Число вспышек F	Среднее удельное число вспышек F/Nf	Вспышечный индекс A	Удельный индекс вспышки A/N	A/Nf
Ядра КА	706	115	490	0.69	190.62	0.27	1.66
Ветви КА	329	57	92	0.28	39.24	0.12	0.69
АО вне КА	685	55	162	0.24	54.05	0.08	0.98
Всего	1720	234	744		284.89	0.17	1.22

GOES. Поток рентгеновского излучения может быть отнесен к одному из классов А, В и С.

$$A = (1 - 9) \times 10^{-8} \text{ Вт/м}^2,$$

$$B = (1 - 9) \times 10^{-7} \text{ Вт/м}^2,$$

$$C = (1 - 9) \times 10^{-6} \text{ Вт/м}^2.$$

Патрульные наблюдения показали, что изменения фонового рентгеновского излучения обычно заключены в пределах от $A < 1$ в минимуме солнечного цикла до $C < 5$ в максимуме солнечного цикла. Та же система обозначений применяется для обозначения вспышек, максимальные интенсивности рентгеновского излучения которых лежат в пределах

$$(1 - 9) \times 10^{-6} \text{ Вт/м}^2 \text{ (класс С),}$$

$$(1 - 9) \times 10^{-5} \text{ Вт/м}^2 \text{ (класс М),}$$

$$(1 - n) \times 10^{-4} \text{ Вт/м}^2 \text{ (класс Х),}$$

где n ограничено возможностями сенсора. На основании этой номенклатуры были введены следующие классы для рентгеновских вспышек. Малыми называются все вспышки баллов А, В и С. Средние вспышки – все вспышки в пределах от М1 до М4.9 (М1 – 10^{-5} Вт/м², М4.9 – 4.9×10^{-5} Вт/м²). Все вспышки больше М5 считаются большими или сильными (М5 – 5×10^{-5} Вт/м²). Запись “вспышечный индекс данной вспышки равен М7.6” означает, что излучение во время максимума ее развития соответствовало величине 7.6×10^{-5} Вт/м², а соответствующая вспышка должна считаться сильной.

Вспышечные индексы для каждой вспышки классов М и Х занесены в таблицу. Выполнены расчеты суммарных значений вспышечного индекса А для всех вспышечно-активных областей в 24 цикле, генерировавшим хотя бы одну вспышку МХ-классов. Характеристики вспышечной активности в 24 цикле приведены в табл. 4.

Интегральный вспышечный индекс в 24 цикле по результатам суммирования значений вспышечного индекса для всех вспышек МХ-классов составил 284.89, в том числе 118.91 в северном полушарии и 165.98 в южном полушарии. Значение суммарного вспышечного индекса для вспышек,

происшедших в ядрах КА, составило 190.62, для вспышек в ветвях КА – 39.24, для вспышек в АО вне КА – 54.05. Удельные значения суммарного вспышечного индекса, отнесенного к числу АО, находившихся в ядрах КА, в ветвях КА и вне КА, составили соответственно 0.27, 0.12 и 0.08. Среднее значение удельного вспышечного индекса A/N для АО в ядрах КА, таким образом, более чем втрое превышает среднее значение для АО вне КА и более чем вдвое – среднее значение для АО-ветвей КА. Если рассматривать средний удельный вспышечный индекс A/Nf только для вспышечных АО в ядрах КА, ветвях КА и вне КА, соответствующие значения оказываются иными – 1.66 : 0.69 : 0.98. По-прежнему, наибольшее энерговыделение во вспышках регистрируется в АО, находящихся в ядрах КА, а самое низкое – в ветвях КА.

Как следует из табл. 4, всего 162 вспышки (21.8% от общего числа вспышек) наблюдались вне ядер и ветвей КА, в том числе 51 вспышка в северном полушарии и 111 в южном полушарии. Таким образом, более 79% всех вспышек указанных классов в 24 цикле имели отношение к КА.

Распределение вспышечных АО по полушариям приведено в табл. 5. В ней указано число АО, генерировавших вспышки МХ-классов. В скобках во втором столбце приведено число АО, находившихся в пределах ядра вспышечных КА. Как правило, вспышка приписывается одной АО, но находящиеся в компактном ядре КА все АО участвуют во вспышке, поэтому число фактически вспышечных АО оказывается несколько больше.

Таким образом, из 234 вспышечно-активных АО 179 (76%) имеют отношение к КА. В том числе 67% произошли в АО, находившихся в ядрах КА и 9% – в АО, составляющих ветви КА. Почти четверть (24%) вспышечных АО не имеют отношения к КА.

4. LDE-ВСПЫШКИ В 24 ЦИКЛЕ

В числе солнечных вспышек выделяется особый класс LDE (Long Decay Events) событий, отличающихся продолжительной (более 4 часов)

Таблица 5. Продуктивность вспышечно-активных АО в 24 цикле

	Число вспышечных АО в ядрах КА	Число вспышечных АО в ветвях КА	Число вспышечных АО в КА	Число вспышечных АО вне КА	Всего вспышечных АО
Северное полушарие	58 (+ 19 = 77)	10	87	21	108
Южное полушарие	57 (+ 24 = 81)	11	92	34	126
Всего	115 (158)	21	136 (179)	55	234

фазой спада мягкого рентгеновского излучения. События такого класса исследовались рядом авторов [14–17]. В работе [18] впервые была продемонстрирована значимая корреляция числа LDE-вспышек с параметрами (количеством и мощностью) комплексов активности – 87% по данным 21 цикла. В нашей предыдущей работе [19] показано, что в АО за пределами КА таких событий практически не бывает. Этот предварительный вывод был сделан на основании сравнительно небольшой статистики (18 событий), относившейся к началу 24 цикла.

Рассмотрим более полные данные за весь 24 цикл. Всего по регистрациям спутниками GOES вспышек МХ-классов выделены 63 события LDE-типа (8.5% от общего количества), в том числе 37 в южном полушарии и 26 в северном (табл. 6). Следует иметь в виду, что наблюдались также LDE-вспышки С-класса, но они в настоящей работе не учитываются. Статистика LDE-вспышек МХ-классов приведена в табл. 7.

Ранее полученные данные [2, 19] подтверждаются: 87% LDE-вспышек рентгеновских классов М и Х наблюдались в КА. В числе LDE-вспышек 16 (25% от общего количества) относятся к рентгеновскому Х классу. Распределение этих вспышек оказалось подобным распределению, приведенному в предыдущей таблице.

Таблица 6. LDE-вспышки в 24 цикле

	В ядрах КА	В ветвях КА	Вне КА	Всего
Северное	20	6	0	26
Южное	24	5	8	37
Всего	44	11	8	63
	70%	17%	13%	

Таблица 7. LDE-вспышки Х-класса в 24 цикле

	В ядрах КА	В ветвях КА	Вне КА	Всего
Северное	1	3	0	4
Южное	10	0	2	12
Всего	11	3	2	16
	69%	19%	12%	

5. ВСПЫШКИ С ПРОДОЛЖИТЕЛЬНЫМ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕМ В 24 ЦИКЛЕ

В числе вспышек на Солнце особое место занимают события, сопровождающиеся излучением в гамма-диапазоне спектра. В работе [20] приведен каталог таких вспышек, наблюдавшихся в 24 цикле с КА Fermi прибором LAT. Этот список содержит 31 событие (первое – в марте 2011 г., последнее – в июне 2015 г). Как правило (но не всегда), это вспышки высоких рентгеновских классов, причем все они сопровождались корональными выбросами массы. Изучение этих событий представляет большой интерес, прежде всего из-за большой продолжительности гамма-излучения (более пяти часов), что может помочь уточнению последовательности процессов ускорения частиц во вспышке. Этот вопрос требует дальнейшего изучения и будет проанализирован в следующей работе. Кроме того, необходимо отметить, что все гамма-вспышки происходили вблизи границ корональных дыр, и это обстоятельство также требует специального исследования. В упомянутом каталоге [20] одна вспышка относится к С-классу, 14 – к М-классу, 16 – к Х-классу. Анализ локализаций гамма-вспышек на поверхности Солнца показал, что 14 этих событий наблюдались в ядрах КА, 9 – в ветвях КА (всего 74% вспышек связаны с КА). Восемь вспышек произошли в АО вне КА. Существенно, что семь из девяти вспышек в ветвях КА возникли в двух АО: пять в АО № 1429, две – в АО № 1882. Восемь гамма-вспышек вне КА произошли в четырех АО, в том числе две в АО № 1226, и четыре в АО № 1748. Эти группы пятен требуют специального исследования.

6. ПРОТОННЫЕ ВСПЫШКИ В 24 ЦИКЛЕ

Связи протонных вспышек с КА были посвящены наши предыдущие работы [3, 19]. В работе [3] показано, что вспышки на Солнце, которые сопровождались потоками частиц на орбите Земли, превышающими 10 частиц на квадратный сантиметр в секунду с энергией, превышающей 10 МэВ в 24 цикле, происходили преимущественно в КА (в 82%).

7. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В результате проведенного исследования вспышечной деятельности в 24 цикле уверенно подтверждается ранее сделанный [1] предварительный вывод о том, что КА являются местами преимущественной локализации солнечных вспышек разных типов.

Динамика развития самих КА на протяжении трех минувших циклов (22–24) демонстрирует 1) проявление северно-южной асимметрии параметров КА в 23 и 24 циклах и 2) чередование знака асимметрии от цикла к циклу. При этом средняя мощность КА в 24 цикле оказалась самой низкой из трех последних циклов. В 24 цикле 60% АО оказались в составе КА, либо в ядрах (41%), либо в ветвях (19%). При этом 78% всех вспышек МХ-классов, наблюдавшихся в цикле, произошли в КА (в том числе 68% – в ядрах КА). Для разных подклассов вспышек основной вывод сохраняется – в КА произошли 87% всех LDE-событий МХ-классов и 74% всех гамма-вспышек.

Таким образом, факты говорят о значимой роли КА в генерации средних и сильных вспышек на Солнце. Статистика солнечных вспышек показывает, что можно говорить о трех типах АО, различающихся с точки зрения их вспышечной продуктивности. Один тип – это группы пятен, возникающие в ядрах КА. Они отличаются преимущественно более высокой площадью [2, 21], появляются и развиваются в зонах, не смещающихся со временем в кэррингтоновской системе координат. Второй тип – АО, находящиеся за пределами ядер КА, но физически связанные с ними через системы высоких корональных петель [1]. Эти группы пятен вращаются со скоростью, соответствующей их широте, их вспышечная активность существенно ниже, чем у АО в ядрах КА. Наконец, третий тип АО – группы пятен, не имеющие отношения к КА. Это наименее вспышечно-активные образования, преимущественно с небольшой площадью и тоже, как и ветви КА, подверженные дифференциальному вращению. Крайне немногочисленные исключения – примеры АО этого типа, у которых регистрировались большая площадь и высокая вспышечная активность, – требуют специального исследования.

Альтернативный подход, не использующий понятие КА, был применен Наговицыным и его соавторами [22–24]. В этих работах сделан вывод о том, что все группы пятен могут быть разделены на две независимые популяции SSG (Small Short-living Groups) и LLG (Large Long-living Groups). Это популяции различаются по двум параметрам: продолжительности существования (короче либо дольше 5 суток) и напряженности магнитного поля (ниже или выше 2000 Гс). Вполне возможно, что крупные долгоживущие группы пятен LLG во

многом аналогичны популяциям АО, развивающимся внутри ядер КА, а небольшие короткоживущие группы пятен SSG преимущественно относятся к типу, не имеющему отношения к КА. Тем не менее очевидно, что это не тождественные понятия: в пределах ядер наблюдаются и группы пятен не очень большой площади (мощность $P = 0.5$ или 1), в то же время иногда за пределами КА возникают крупные группы пятен с большой площадью, отличающиеся высокой напряженностью магнитного поля.

Для групп пятен в ядрах КА характерны следующие важные свойства [2]. Во-первых, это длительное существование (вплоть до 17 солнечных оборотов, [9]). Другими словами, здесь отмечается последовательное всплытие магнитных потоков новых АО практически в одном и том же месте – внутри ядра КА. Во-вторых, для ядер КА характерна кэррингтоновская скорость вращения (вне зависимости от широты образования) и неподверженность дифференциальному вращению на стадии развития пятен. После исчезновения пятен наблюдается быстрая (обычная) деформация структуры распадающегося магнитного поля АО КА дифференциальным вращением.

Эти два важных свойства могут быть объяснены особенностями конвекции. На возможную связь КА с двумя разными системами магнитных полей, связанными с разными ярусами конвекции разных масштабов, указывал Иванов [25]. В этой работе обосновано предположение, что одна из систем магнитных полей, проявляющаяся в виде мощных долгоживущих центров активности (по-видимому, аналога понятия ядер КА), образует крупномасштабную структуру с ячейками, размеры которых составляют 90° по гелиодолготе, что вблизи экватора превышает 1000 Мм. Эта система вращается как твердое тело с периодом 27.3 суток и, по-видимому, связана с глобальным полем Солнца, лежащим в основании конвективной зоны. К границам ячеек такого поля концентрируются мощные группы пятен. Другая компонента, соответствующая фоновому магнитному полю, согласно [25], образует структуру с ячейками, размеры которых составляют $20\text{--}40^\circ$ ($240\text{--}480$ Мм), периоды вращения элементов этой системы – факелов и небольших пятен – соответствуют значениям 27.6–27.8 суток. Система фоновых полей связана, в рамках этой концепции, с промежуточным ярусом конвекции, который лежит между ярусами конвекции, определяющими супергрануляцию – систему глубинных гигантских ячеек. Следует отметить, что эта идея согласуется с моделью формирования магнитного потока и эволюции пятен и крупномасштабных полей, предложенной Мак-Интошем и Вилсоном [26] и допускающей существование ячеек промежуточного размера между слоем супергранул и нижним слоем гипотетических гигантских ячеек.

Модель связывала появление сложных мультиполярных групп пятен с влиянием указанных слоев ячеек разных размеров.

Вывод о существовании двух популяций групп пятен приведен в работах Наговицына и его соавторов [22–24, 27]. Здесь было представлено предположение, что на Солнце может действовать пространственно распределенное динамо: двум указанным популяциям пятен соответствуют разные области генерации: глубинная (в тахоклине) и приповерхностная (в лептоклине). Эта гипотеза, с точки зрения авторов данной работы, неплохо согласуется с выдвинутыми ранее гипотезами Иванова (описана выше, [25]), а также Сидорова и Язева [2, 28–30]. В последней гипотезе речь идет о связи ядер КА с крупномасштабными конвективными ячейками, возможно, закрепленными вблизи дна конвективной зоны на уровне тахоклина. Эти ячейки обеспечивают долговременный последовательный выход магнитных полей на одном и том же участке фотосферы в кэррингтоновской системе координат на протяжении всего времени существования такой ячейки. Взаимодействие старых и новых систем магнитного поля в одном и том же месте объясняет повышенную вспышечную активность, включая генерацию LDE-вспышек. В отличие от групп пятен в ядрах КА, группы пятен, составляющие ветви КА, формируются в поверхностных слоях конвективной зоны и обладают некеррингтоновским вращением. Даже будучи связанными с пятнами в ядрах КА через высокие корональные петли, ветви не демонстрируют высокую вспышечную активность. Что же касается групп пятен, не связанных с КА, то они преимущественно возникают на уровне лептоклина, не обладая высокой продолжительностью жизни, большой площадью и соответственно высокой вспышечной активностью. Дополнительным фактором, способствующим повышению вспышечной активности АО, по-видимому, является близость коронального дыра [3]. Этот вопрос требует отдельного изучения и будет рассмотрен в нашей следующей работе.

В целом ключевая идея, связывающая КА с повышенной вспышечной активностью, предложена в работе [18] и обсуждена в [2]. Речь идет о том, что с одной стороны, АО в составе КА связаны высокими системами корональных петель, с другой стороны, ядра КА являются областями постоянного всплытия новых порций магнитного поля. Взаимодействие старых и новых магнитных полей приводит к повышенной вероятности генерации вспышек, включая длительные (LDE) события.

Данные, приведенные в настоящей работе, демонстрируют, что наиболее мощные события в ядрах КА попадают в перечень LDE-вспышек, а также протонных и гамма-вспышек. Чем больше

энерговыведение вспышки, тем больше вероятность, что событие попадет во все указанные перечни. Такие вспышки происходят, как правило, в наиболее крупных АО с большой площадью, сложной магнитной структурой и сложной конфигурацией нейтральной линии, вероятность обнаружения таких АО оказывается повышенной именно в ядрах КА [31–33].

Таким образом, результаты анализа статистики вспышечной деятельности Солнца в 24 цикле показывают, что значительная (около 80%) доля всех средних и сильных вспышек на Солнце связана с деятельностью АО, развивающихся в пределах ядер КА. Приведены дополнительные аргументы в пользу гипотезы о том, что ядра КА связаны, в свою очередь, с крупномасштабными конвективными ячейками в глубине конвективной зоны Солнца.

Исследования параметров АО, которые могли бы в режиме “онлайн”, еще во время существования пятен, позволить отождествить их принадлежность к КА, могут открыть путь к совершенствованию прогноза уровня вспышечной активности для той или иной группы пятен.

Информация о внеатмосферных обсерваториях GOES и SDO приведена, в частности, в работах [34, 35].

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны рецензенту за полезные замечания и обсуждение.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при частичной поддержке проекта 3.9620.2017/БЧ Министерства науки и высшего образования РФ, а также поддержана проектом П.16.3.1 Института солнечно-земной физики СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. A. Yazev, *Astronomy Reports* **59**, 228 (2015).
2. С. А. Язев, *Феномен комплексов активности на Солнце* (Иркутск: Изд-во ИГУ, 2014); S. A. Yazev *The Phenomenon of Activity Complexes on the Sun* (Irkutsk. Gos. Univ., Irkutsk, 2014) [in Russian].
3. E. S. Isaeva, V. M. Tomozov, and S. A. Yazev, *Astronomy Reports* **62**, 243 (2018).
4. Каталог <http://umbra.nascom.nasa.gov/SEP/>
5. В. Г. Банин, С. А. Язев, *Кинематика и физика небесных тел*, **5**, № 4, 62 (1989).
6. С. А. Язев, препринт http://ru.iszf.irk.ru/images/f/f2/000_ТАБЛИЦА_КА_В_24_ЦИКЛЕ_для_сайта_ИСЗФ_СО_РАН.doc (2019)
7. С. А. Язев, *Изв. Иркутск. гос. ун-та. Сер. Науки о Земле* № 5, 295 (2012).

8. В. Г. Банин, С. А. Язев, Исслед. геомагн., аэрон. и физ. Солнца **95**, 141 (1991).
9. С. А. Язев, Изв. Иркутск. гос. ун-та. Сер. Науки о Земле № 2, 217 (2010).
10. База данных (свидетельство о госрегистрации № 2014621721, 11.12.2014).
11. В. Н. Обридко, в сб.: *Плазменная гелиогеофизика*, в 2-х т., ред. Л. М. Зеленый, И. С. Веселовский (М.: Физматлит, 2008), т. 1.
12. С. А. Язев, А. В. Коротких, И. Г. Тарлюк, Солнечно-земная физика, **19**, 3 (2011).
13. В. Н. Ишков, Земля и Вселенная, № 3, 22 (2010).
14. A. Antalova, Catalogue of the LDE Flares (January 1969–March 1986) / Contr. Astron. Obs. Skalnatu Pleso, **16**, 79 (1987).
15. A. Antalova and M. V. Ogir, Astron. Inst. Czechosl. **35**, 276 (1984).
16. A. Antalova and M. V. Ogir, Bull. Astron. Inst. Czechosl. **37**, 344 (1986).
17. A. Antalova and M. V. Ogir, Bull. Astron. Inst. Czechosl. **39**, 97 (1988).
18. В. Г. Банин, С. А. Язев, Г. М. Хмыров, Солнечные данные, № 3, 116 (1991).
19. Е. С. Исаева, С. А. Язев, Солнечно-земная физика, **22**, 3 (2013).
20. G. H. Share et al. Astrophys. J. **869**, 182 (2018).
21. С. А. Язев, А. И. Рожина, в сб: *Труды IV съезда Астрономического общества*, Москва, 19–29 ноября 1998 г. (М.: СП, 1998), с. 237.
22. Yu. A. Nagovitsin, A. A. Pevtsov, Astrophys. J. Lett. **833**, 94 (2016).
23. Yu. A. Nagovitsin, A. A. Pevtsov, A. A. Osipova, A. G. Tlatov, E. V. Miletskii, and E. Yu. Nagovitsina. Astronomy Letters **42**, 703 (2016).
24. A. A. Osipova, Yu. A. Nagovitsin, Geomagnetism and Aeronomy **57**, № 8, 1092 (2017).
25. Е. В. Иванов, Солнечные данные, № 11, 52 (1986).
26. P. S. McIntosh, P. R. Wilson, Solar Physics **97**, 59 (1985).
27. В. Н. Обридко, Ю. А. Наговицын, *Солнечная активность, цикличность и методы прогноза* (СПб, Изд-во ВВМ, 2017).
28. С. А. Язев, Солнечно-земная физика **16**, 94 (2010).
29. С. А. Язев, В. И. Сидоров, в сб: *Труды X конференции молодых ученых “Современные проблемы в астрофизике и физике космической плазмы”*. Иркутск, ИО ИСЗФ СО РАН, 65 (2007).
30. С. А. Язев, в сб: *Астрономия-2018. Солнечно-земная физика – современное состояние и перспективы*. Том.2 Москва, Изд-во ИЗМИРАН, 274 (2018).
31. В. Г. Банин, Исслед. геомагн., аэрон. и физ. Солнца **65**, 129 (1983).
32. D.A. Falconer, R. L. Moore, A. F. Barghouty, and I. Khazanov, Space Weather **12**, 306 (2014).
33. V. M. Sadykov and A. G. Kosovichev, Astrophys. J. **849**, 148 (2017).
34. W. D. Pesnell, B. J. Thompson and P. C. Chamberlin, Sol. Phys. **275**, 3 (2012).
35. F. A. Hanser, F. B. Sellers, Proceedings of the SPIE **2812**, 344 (1996).