

УДК 523.98

АКТИВНЫЕ ОБЛАСТИ НА СОЛНЦЕ С ПОВЫШЕННОЙ ВСПЫШЕЧНОЙ АКТИВНОСТЬЮ В 24 ЦИКЛЕ

© 2021 г. С. А. Язев^{1, 2, *}, Е. С. Исаева^{1, 2}, Ю. В. Ишмухаметова¹

¹ Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

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

*E-mail: syazev@gmail.com

Поступила в редакцию 30.10.2020 г.

После доработки 25.01.2021 г.

Принята к публикации 15.02.2021 г.

Проанализированы активные области (АО) на Солнце, отличающиеся высокими значениями вспышечного индекса и в то же время развивавшиеся вне комплексов активности (КА). Таких объектов в 24 цикле выделено 13. Показано, что эти АО относятся к разряду сравнительно долгоживущих крупных групп пятен, отличающихся повышенной скоростью роста площади. Эти АО входят в состав комплексов АО, соединяются с другими АО системами высоких корональных систем, включая трансэкваториальные. Часть таких АО ассоциируется авторами с короткоживущими (менее 3 кэррингтоновских оборотов) комплексами активности, часть является компонентами комплексов активных областей. Все 13 рассмотренные АО находились рядом с корональными дырами.

Ключевые слова: солнечные вспышки, 24 цикл, вспышечноактивные области

DOI: 10.31857/S0004629921070069

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, как и многие десятилетия назад, солнечные вспышки являются важными объектами исследований благодаря своему влиянию на околоземную среду. Природа вспышек и связанных с ними выбросов определяется диссипацией энергии магнитных полей, которые образуют на поверхности Солнца структуры, подверженные воздействию различного рода движений вещества. Давно выяснено, что за немногими редкими исключениями [1–3] вспышки возникают в пределах активных областей, возле групп пятен [4, 5]. Тем не менее хорошо известно, что группы пятен существенно различаются между собой с точки зрения их вспышечной активности. В некоторых группах пятен могут вообще не наблюдаться вспышки, в других же могут происходить целые серии сильных вспышек высоких рентгеновских классов. Разброс в значениях суммарной энергии вспышек, которые наблюдаются в разных активных областях (АО), может достигать нескольких порядков величины. В связи с этим вопрос о том, по каким причинам та или иная группа пятен может стать (или не стать) вспышечноактивной, был и остается актуальным.

На протяжении многих лет исследователи постепенно выделяли статистические и морфологические свойства групп пятен, пытаясь выявить их связь с потенциальным уровнем вспышечной ак-

тивности. Давно отмечена связь цюрихского класса групп пятен со способностью АО генерировать вспышки [6]. Гелиофизикам хорошо известно, что вспышки связаны с процессами, сопровождающимися выходом из-под фотосферы новых порций магнитного потока [7]. Считается вспышечноопасным наличие в структуре групп пятен так называемых дельта-конфигураций, когда в протяженной полутени одного и того же пятна наблюдаются элементы тени с противоположными магнитными полярностями [8, 9]. Отмечено, что в качестве признака потенциально повышенной вспышечной активности может рассматриваться вращение крупных пятен [9, 10]. Перед вспышками и во время вспышек зарегистрированы также сдвиговые движения вещества вдоль линии раздела полярностей (далее ЛРП) магнитных полей [11]. Набор этих и ряда других признаков легли в основу разработки действующих алгоритмов прогнозирования повышенной вспышечной опасности.

В то же время оправдываемость прогнозов вспышек пока еще далека от желаемой. Наблюдатели регулярно сталкиваются с ситуацией, когда сходные с точки зрения морфологии группы пятен существенно различаются по уровню вспышечной активности.

Авторы продолжают проверять гипотезу, связывающую уровень вспышечной активности

групп пятен с их принадлежностью или же не принадлежностью к комплексам активности (КА). В понятие КА разными авторами в разное время вкладывался разный смысл [12–17]. Наиболее распространенным является классическое восприятие КА как системы из нескольких близко расположенных АО, физически связанных между собой. Современные средства наблюдений (прежде всего в ультрафиолетовом диапазоне спектра) демонстрируют, как АО могут быть связаны друг с другом через высокие корональные петли, иногда протягивающиеся на значительные расстояния (как правило, до 40 гелиографических градусов). Такие крупномасштабные системы получили название комплексов активных областей (КАО) [17, 18]. В ряде случаев понятия КА и КАО воспринимаются как тождественные.

Следуя концепции иркутской школы, заложенной В.Г. Баниным в восьмидесятые годы прошлого века, в настоящей работе КА рассматриваются как долгоживущие (наблюдающиеся на протяжении нескольких кэррингтоновских солнечных оборотов) магнитные структуры. Известно, что типичные группы пятен редко существуют в течение нескольких недель (и тем более месяцев). Поэтому, если на одном и том же месте в кэррингтоновской системе координат в течение нескольких оборотов наблюдаются пятна, как правило, это разные группы пятен, последовательно появляющиеся на одном и том же месте. Такие области с характерным размером 20×20 гелиографических градусов в рамках описываемой концепции получили название ядер КА [19, 20].

Известны случаи, когда ядро КА существовало на протяжении 15–17 солнечных оборотов, и за это время в ядре КА могли смениться последовательно появлявшиеся десятки АО. Неподверженность ядер КА дифференциальному вращению позволила предположить, что эти структуры связаны с глубинными слоями конвективной зоны, для которых характерна ослабленная (по сравнению с поверхностными слоями) дифференциальность, а скорость вращения близка к кэррингтоновской. Отмечены случаи, когда несколько ядер КА, находясь на расстоянии менее 40° друг от друга, могут располагаться в пределах общего протяженного флоккулярного поля и быть связанными друг с другом высокими корональными петлями. Такие КА считаются многоядерными.

В то же время существуют так называемые ветви КА – АО, скорость вращения которых определяется гелиографической широтой (законом дифференциального вращения) и которые существуют не более одного кэррингтоновского оборота, но связаны (как правило, высокими корональными петлями) с ядром КА, располагаясь на расстояниях до 40° .

В рамках такого подхода КАО может рассматриваться как временной срез, “моментальный снимок” КА, отражающий состояние КА в данном кэррингтоновском обороте. Какие компоненты КАО относятся к ядрам КА, а какие принадлежат ветвям, можно определить, лишь обладая информацией о развитии таких структур на протяжении нескольких солнечных оборотов.

Ранее удалось показать, что именно принадлежность группы пятен к ядру либо ветви КА является важным статистическим признаком ее потенциально повышенной вспыхивающей активности. Так, по результатам [21], за период с января 2009 г. по январь 2019 г. 78.2% всех вспышек с рентгеновскими классами, начиная с M1.0, произошли в АО, располагавшихся в ядрах и ветвях КА. 87% всех так называемых LDE-вспышек и 100% гамма-вспышек наблюдались в КА [21, 22], около 80% протонных событий, оказавших влияние на околоземную среду, произошли в КА [23].

Гипотеза, объясняющая причину более высокой вспыхивающей активности в тех АО, которые развиваются в ядрах или в ветвях КА, была выдвинута в работе [24], развита в последующих работах [20, 21, 23] и сводится к следующему. Ядра КА являются местами последовательного выхода новых порций магнитного потока (проявляющихся в форме АО), поэтому именно здесь осуществляется взаимодействие “старых” и “новых” магнитных систем, а также магнитных систем АО в ядрах и систем АО в ветвях, которые обладают значительными запасами свободной магнитной энергии. Процессы взаимодействия магнитных систем, основанные на механизме пересоединения магнитных силовых линий, приводят к выделению этой энергии в сильных вспышках. С этой точки зрения, возникновение сильных вспышек в ядрах и отчасти в ветвях КА не вызывает вопросов и выглядит естественным процессом.

В то же время при анализе рентгеновских вспышек в 24 цикле активности была выделена особая популяция АО, не относящихся к КА, но в которых, тем не менее, тоже наблюдались рентгеновские вспышки классов M–X. Именно эти области, названные аномальными в указанном смысле, стали объектом исследования в настоящей работе.

2. АКТИВНЫЕ ОБЛАСТИ В 24 ЦИКЛЕ. СРЕДНЕСТАТИСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

Согласно данным [25], с 1 января 2009 г. по 31 декабря 2018 г. на видимом полушарии Солнца было выделено 1700 АО. Сравнение с каталогом КА [26] позволило разбить все АО, наблюдавшиеся в течение указанного периода, на три типа: АО в ядрах КА (382 объекта), АО в ветвях КА (148) и АО вне КА (1157). Соотношение этих типов АО,

выраженное в процентах, составило $22.4 : 8.7 : 68.9$. Таким образом, 30% всех АО в 24 цикле за указанный период имели отношение к КА.

Был составлен отдельный каталог вспышечных групп пятен в 24 цикле, в которых наблюдались вспышки классов М-Х. Таких АО оказалось 198 (11.8% от общего числа), в том числе 32.7% АО в составе ядер КА, 16.2% АО в составе ветвей АО, и всего 4.3% в составе АО вне КА. Эта статистика еще раз подтверждает, что АО в составе КА обладают существенно более высокой вспышечной продуктивностью, чем АО вне КА.

Для каждой АО вне КА, где происходили вспышки классов М-Х, был рассчитан суммарный вспышечный индекс по правилу, применявшемуся в работе [21]. Напомним, что используется следующая классификация для обозначения вспышек, чьи максимальные интенсивности рентгеновского излучения 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. Малыми называются все вспышки баллов С и меньше, средними — вспышки в пределах от М1 до М4.9 ($M1 - 10^{-5} \text{ Вт/м}^2$, $M4.9 - 4.9 \times 10^{-5} \text{ Вт/м}^2$). Вспышки класса больше М5 ($M5 - 5 \times 10^{-5} \text{ Вт/м}^2$) относятся к сильным. Например, запись “вспышечный индекс данной вспышки равен М8.1” означает, что излучение в максимуме ее развития достигло значения $8.1 \times 10^{-5} \text{ Вт/м}^2$, а соответствующая вспышка может быть отнесена к разряду сильных. Суммарный вспышечный индекс данной АО представляет собой индекс суммы максимальных значений интенсивности всех вспышек классов М и Х, наблюдавшихся в данной АО.

Как указано выше, АО вне КА, в которых наблюдались вспышки классов М-Х, были названы аномальными (далее ААО) — в том смысле, что в рамках используемой концепции КА, генерация вспышек классов М-Х в АО, расположенных вне КА, выглядит неожиданной.

Перечень ААО в 24 цикле приведен в табл. 1. В 24 цикле их оказалось всего 13. В первом столбце табл. 1 указан номер АО по порядку, во втором — последние четыре цифры номера АО согласно номенклатуре NOAA, в третьем столбце приведен номер кэррингтоновского оборота, в котором наблюдалась данная АО, в четвертом и пятом столбцах указаны, соответственно, кэррингтоновская гелиографическая долгота и гелиографическая широта. В шестом столбце дана максимальная площадь $S_{\max}$, которой достигла данная группа пятен, и выраженная в миллионных долях полушария (мдп), данные взяты в [25]. В седьмом

столбце приведен суммарный вспышечный индекс, рассчитанный по всем вспышкам классов М-Х, происшедших в данной АО. В восьмом столбце указано количество суток T_e , прошедших от даты возникновения (обнаружения) АО до даты достижения ею максимальной наблюдаемой площади АО. Девятый столбец содержит значения средней скорости роста площади группы пятен V_e от даты возникновения (обнаружения) группы пятен до даты достижения ею наблюдаемой максимальной площади. В десятом столбце приведено общее количество суток T , на протяжении которых на диске наблюдалась анализируемая ААО. Очевидно, что эта величина ограничена скоростью синодического вращения Солнца, и в тех случаях, когда ААО существовала на западном лимбе перед заходом за него, все значения должны быть увеличены на неизвестное число суток существования за лимбом. Это же замечание касается и даты достижения максимальной площади, которое может оказаться за западным лимбом.

Рассмотрим основные среднестатистические характеристики АО в 24 цикле за рассматриваемый период, которые приведены в табл. 2. Данные о площади и продолжительности наблюдений всех АО в 24 цикле активности на солнечном диске взяты в [25], средние параметры рассчитаны авторами.

В первом столбце указан тип АО в зависимости от ее местонахождения, во втором столбце приведено количество рассмотренных АО соответствующего класса, наблюдавшихся в 2009—2018 гг., в третьем — средняя скорость роста площади группы пятен V_e от даты первого обнаружения группы пятен до даты достижения максимальной площади. В четвертом столбце указано среднее число суток, в течение которых возрастала площадь группы пятен T_e , в пятом столбце — средняя наблюдавшаяся максимальная площадь группы пятен $S_{\max}$, в шестом столбце — средняя продолжительность существования группы пятен T от даты появления (наблюдения) до даты исчезновения (либо ухода за западный лимб). В седьмом столбце указана средняя скорость уменьшения площади группы пятен V_d от даты достижения максимальной площади группы пятен до даты исчезновения, либо захода за западный лимб. Необходимо отметить, что скорость уменьшения площади удалось вычислить не для всех событий (их число указано в скобках в последнем столбце). Это связано с тем, что часть пятен ушли за лимб до достижения максимальной площади.

Судя по данным в табл. 2, для каждого типа групп пятен характерно свое типичное значение указанных параметров. В обычных АО за пределами КА площадь группы пятен растет в среднем со скоростью 34 мдп в сутки, несущественно от этого значения отличается скорость роста площа-

Таблица 1. Некоторые параметры аномальных активных областей

№ п/п	№ АО	Номер кэпп. оборота	Кэпп. долгота	Широта	$S_{\max}$, мдп	Суммарный вспышечный индекс	T_e , сут	V_e , мдп/сут	T , сут
1	1041	2092	50	–25	200	1.18	3	66	11
2	1046	2093	185	+20	190	0.83	5	38	11
3	1069	2096	205	+42	170	0.12	2	85	5
4	1166	2107	92	+15	770	2.16	11	70	14
5	1169	2107	60	+20	360	0.52	9	40	12
6	1618	2130	130	+10	450	0.81	7	64	11
7	1652	2132	185	+20	320	0.44	3	106	13
8	1654	2132	148	+20	1100	0.22	4	275	14
9	1726	2136	335	+13	1000	0.10	7	142	8
10	1745	2137	350	+14	600	1.02	3	200	14
11	1748	2137	295	+10	310	9.79	2	155	13
12	2158	2154	95	+15	440	2.05	8	55	14
13	2672	2194	235	+8	270	0.11	3	90	13

Таблица 2. Характеристики активных областей

Тип АО	Число АО	V_e , мдп/сут	T_e , сут	$S_{\max}$, мдп	T , сут	V_d , мдп/сут
АО вне КА	1157	34.4 ± 1	2.9 ± 0.07	116 ± 5.5	6.7 ± 0.1	35.3 ± 2 (1041)
АО в ядрах КА	382	49.3 ± 2.7	3.4 ± 0.1	160.7 ± 10	8.1 ± 0.2	40.6 ± 2.9 (346)
АО в ветвях КА	148	37.4 ± 4.2	2.8 ± 0.2	105.5 ± 14.1	6.5 ± 0.3	31.6 ± 4.7 (132)
Аномальные АО	13	106.6 ± 19.2	5.2 ± 0.8	475.4 ± 85	11.8 ± 0.7	148.3 ± 73.2 (13)

ди группы пятен в ветвях КА – 37 мдп в сутки. Скорость роста площади группы пятен, возникающей в ядре КА, была выше, причем статистически значимо – более чем на 40%. Что касается групп пятен, которые были отнесены к разряду аномальных по признаку их высокой вспышечной активности, скорость роста их площади втрое выше, чем у обычных групп пятен и вдвое выше, чем в ядрах КА. Скорость уменьшения площади у аномальных АО тоже наиболее высока среди всех типов АО – в 4–5 раз выше, чем у ветвей КА и обычных спорадических АО вне КА.

При этом, если среднее количество суток, протекающих от появления до даты достижения максимальной площади, для обычных групп пятен и групп пятен в ветвях КА оказывается примерно одинаковым, в ядрах КА – несколько больше, а в аномальных областях – почти вдвое больше, чем в обычных. Учитывая, что и скорость, и время роста площади в ААО высоки, следует ожидать, что и максимальная площадь группы пятен должна оказаться высокой. Так оно и есть: у обычных групп пятен и у групп пятен в ветвях КА максимальная площадь в среднем несколько превышает 100 мдп (это сравнительно небольшие группы

пятен), средняя максимальная площадь групп пятен в ядрах КА оказалась более чем в 1.5 раза выше, но средняя максимальная площадь ААО почти вчетверо выше средней максимальной площади обычных групп пятен. Надо учитывать крайне малую статистику аномальных групп пятен, но на то они и аномальные.

Соответственно, аномальные области характеризуются самой большой продолжительностью жизни. Таким образом, можно сделать вывод, что аномальные активные области быстро, но долго наращивают площадь, достигают значительных площадей и долго существуют. Этого следовало ожидать, и это подтверждено измерениями.

Отметим, кроме того, явную северно-южную асимметрию расположения ААО в 24 цикле: все они (кроме первой) наблюдались в северном полушарии Солнца.

На рис. 1а приведено распределение всех АО в 24 цикле, находящихся за пределами КА, по значениям максимальной площади $S_{\max}$. Более 67% групп пятен из этой популяции оказались малыми (их максимальная площадь $S_{\max}$ не превышала 100 мдп).

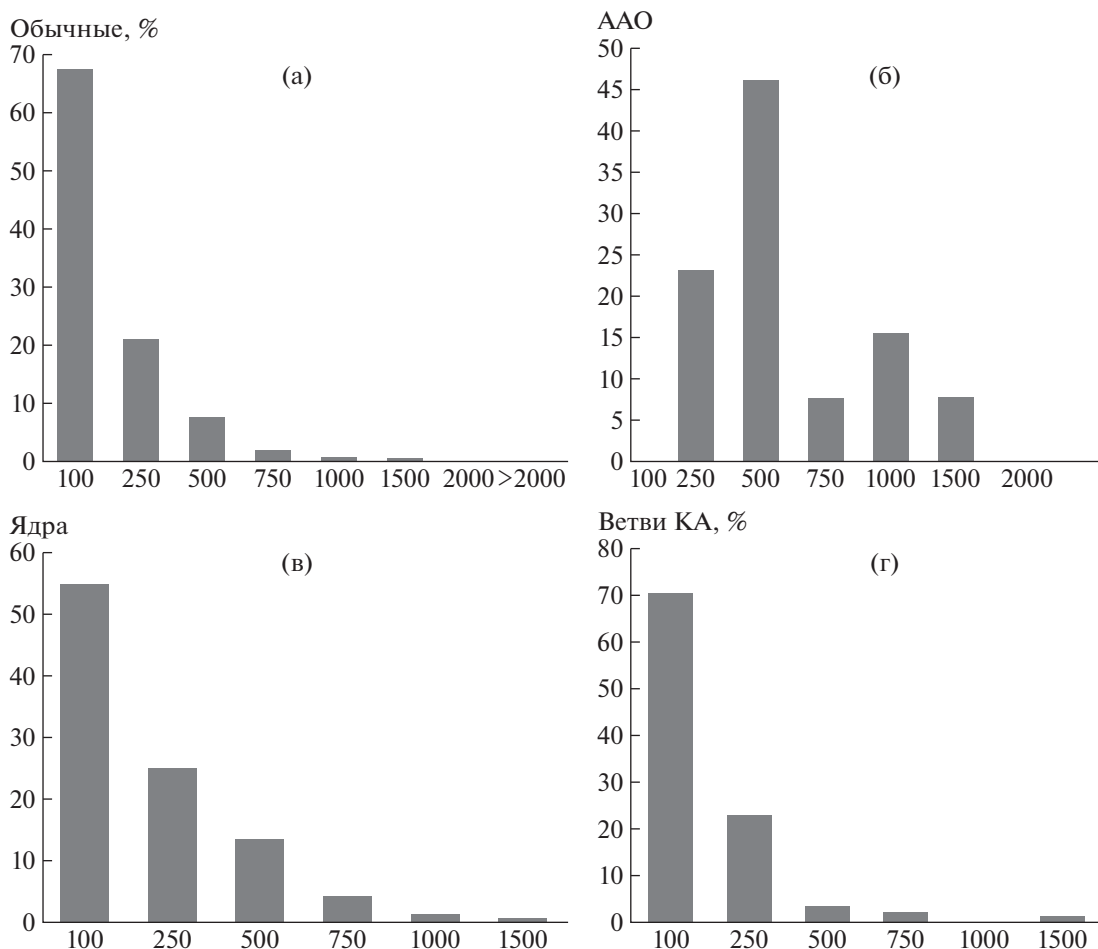


Рис. 1. а — распределение АО вне КА по значениям максимальной площади, б — аналогичное распределение для ААО, в — для АО в ядрах КА, г — для АО в ветвях КА.

Несмотря на малую статистику, видно, что соответствующее распределение ААО (рис. 1б) существенно отличается от предыдущего: максимум $S_{\max}$ лежит в диапазоне площадей 250–500 мдп. Отмечены случаи со значениями $S_{\max}$, превышавшими 1000 мдп, что было крайне редким явлением в 24 цикле [27]. Во всей популяции ААО ни одна группа не оказалась малой ($S_{\max}$ не было меньше 170 мдп). Таким образом, можно констатировать, что ААО отличаются необычным распределением по площади, это относительно крупные группы пятен.

На рис. 2 показаны распределения АО, не имеющих отношения к КА, по продолжительности жизни T . 65% “обычных” группы пятен вне КА существуют до 8 сут. Доля долгоживущих АО, которые живут дольше 14 сут, не превышает 1% (рис. 2а).

Для ААО распределение носит принципиально другой характер — в этой популяции присутствует совсем мало короткоживущих групп пятен, зато групп, существующих более 11 сут, оказыва-

ется более 76% (рис. 2б). Таким образом, в число ААО попадают сравнительно крупные и долгоживущие группы пятен.

Еще одно общее свойство рассматриваемых АО — их явная связь с корональными дырами (КД). Будем называть рекуррентными те КД, которые наблюдаются на протяжении как минимум двух кэррингтоновских оборотов. Для установления возможной связи ААО и КД на синоптические карты, где показаны контуры КД, были нанесены области, где располагались исследуемые АО. Оказалось, что для всех ААО в оборотах, предшествующих оборотам, когда наблюдались ААО, поблизости (в пределах менее 20 гелиографических градусов) наблюдались КД, при этом они оставались на Солнце и в следующем обороте одновременно с ААО. Эти данные приведены в табл. 3.

В первом и втором столбцах табл. 3 указаны номера ААО, в третьем столбце — номер кэррингтоновского оборота, в четвертом — взаимное положение ААО и ближайшей КД, в пятом — дан-

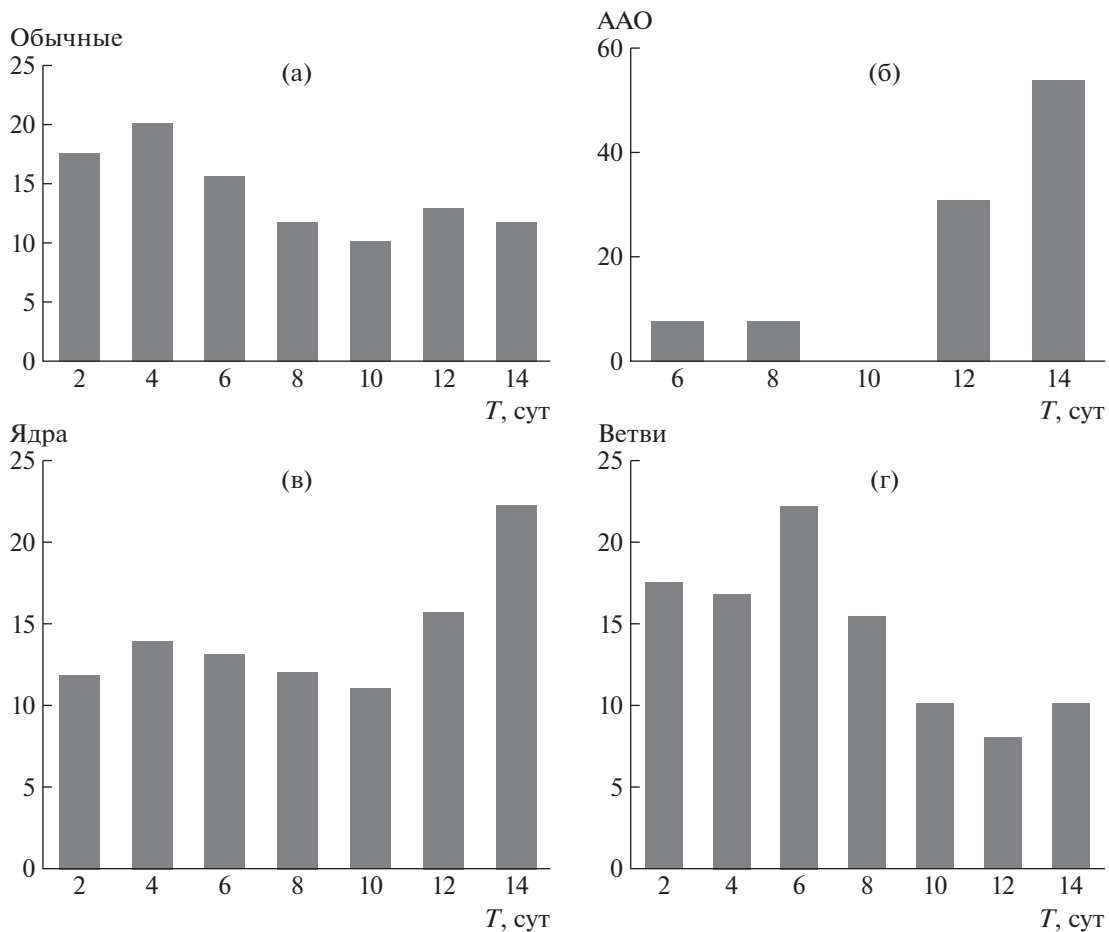


Рис. 2. а — распределение АО, наблюдавшихся вне КА, по продолжительности существования, б — аналогичное распределение для ААО, в — для АО в ядрах КА, г — для АО в ветвях КА.

ные о наличии КД в предыдущем обороте, предшествовавшем появлению ААО. Аббревиатура ЭКД обозначает “экваториальные КД” — КД, не связанные с полярными КД (ПКД).

Таблица наглядно демонстрирует, что а) как минимум, за один оборот до возникновения ААО вблизи (а в некоторых случаях непосредственно на том же месте в кэррингтоновской системе координат) наблюдалась КД, б) КД продолжала существовать одновременно с ААО.

На рис. 3 в качестве примера показана ситуация, связанная с ААО № 1046. Видно, что в 2092 обороте существовали несколько фрагментов КД, на месте одного из них в следующем обороте сформировалась АО 1046.

На рис. 4 показан еще один пример развития аномальных АО вблизи КД. АО 1166 сформировалась в 2107 обороте (рис. 4б) в самом конце протяженной КД, наблюдавшейся в 2106 обороте (рис. 4а). Указанные (и прочие) примеры производят впечатление неслучайной связи между расположением аномальных АО и КД.

Можно констатировать, что в пределах популяций АО, возникающих за пределами КА, ААО заметно выделяются по своим свойствам. В основном это сравнительно крупные и долгоживущие группы пятен, отличающиеся высокой (по сравнению с другими типами АО) скоростью, как роста, так и уменьшения площади. Важным свойством этих АО представляется обязательное присутствие поблизости рекуррентной КД (в некоторых случаях АО возникает прямо на месте КД).

Рассмотрим каждое аномальное событие отдельно.

3. АНОМАЛЬНЫЕ АКТИВНЫЕ ОБЛАСТИ. ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

В настоящем разделе рассмотрены индивидуальные свойства ААО. Особое внимание обращалось на такой параметр, как связь АО с другими близкими АО через высокие корональные петли. Именно это свойство, типичное для АО, входящих в КАО, рассматривалось как фактор, гипоте-

Таблица 3. Аномальные активные области и корональные дыры

№ п/п	№ АО	Номер кэпп. оборота	Примыкающая КД	КД в предыдущем обороте
1	2	3	4	5
1	1041	2092	ЭКД к востоку, вплотную к ААО	ЭКД и к востоку, и к западу от места ААО
2	1046	2093	Цепочка фрагментов КД с юга, продолжающая “рукав” ПКД через экватор, направлена точно к ААО	ЭКД точно на месте ААО
3	1069	2096	ЭКД к западу вплотную к ААО. ЭКД связана с рукавом северной ПКД	ЭКД к западу
4	1166	2107	Цепочка фрагментов ЭКД к западу от ААО, направлена точно к ААО	ЭКД на месте ААО
5	1169	2107	На продолжении цепочки ЭКД, протянутой к АО 1166	ЭКД к западу возле будущей ААО 1166
6	1618	2130	ЭКД к северу и востоку от ААО	ЭКД к западу и к северу от места будущей ААО
7	1652	2132	ЭКД к северо-востоку от ААО	ЭКД там же, что и в 2131 обороте
8	1654	2132	ЭКД к востоку и северу от ААО	ЭКД на том же месте
9	1726	2136	ЭКД к западу от ААО	ЭКД далеко (50° к востоку)
10	1745	2137	Фрагменты ЭКД к югу от ААО через экватор	Фрагменты небольшой ЭКД там же. ААО 1745 рядом (к западу) с местом ААО 1726
11	1748	2137	ЭКД к востоку от ААО	Та же ЭКД к востоку
12	2158	2154	Рукав ПКД направлен к ААО через экватор	Нет КД
13	2672	2194	Рукав ПКД направлен к ААО через экватор	Тот же рукав ПКД существует

тически влияющий на повышенную вспышечную активность ААО.

АО № 1041. Эта АО наблюдалась в обороте 2092. В предыдущем обороте № 2091 на тех же координатах наблюдалась биполярная АО № 1039. В следующем обороте пятен здесь уже не было, поэтому по формальным признакам [20] структура не может быть отнесена к разряду КА, но речь может идти о примере “короткоживущего” КА.

АО № 1046. В предыдущем и последующем оборотах на месте этой АО пятна не наблюдались. Тем не менее в 60° к западу от АО находится ядро КА 24N01 (АО 1045). На снимках SOHO на длине волны 17.1 нм видны трансэкваториальные петли, соединяющие рассматриваемую АО № 1046 в северном полушарии с АО № 1049, расположенной в южном полушарии на расстоянии 40–50° от нее к юго-востоку. Таким образом, АО 1046 может рассматриваться как компонент трансэкваториального КАО, существовавшего в 2093 обороте.

АО № 1069. Одна из немногих высокоширотных АО цикла (северная широта 42°). Ближайшая АО № 1064 в ядре КА 24N02 находится в 40° к

юго-западу. На снимках SOHO петель, соединяющих две АО, не видно.

АО №№ 1166 и 1169. Две АО, расположенные в 30° друг от друга, представляют собой ярко выраженный КАО с типичным расположением входящих в него АО на разных широтах (западная АО ближе к экватору), структура вытянута с юго-запада на северо-восток, как в многоядерных КА. Хорошо видна связь двух АО через корональные петли (рис. 5).

АО № 1618. В лучах 17.1 нм на снимках SDO отчетливо просматриваются трансэкваториальные петли, соединяющие данную АО с яркой областью без пятен (флоккулом) в южном полушарии, где в предыдущем 2129 обороте располагалась вспышечная АО № 1598. В 2130 обороте пятна, очевидно, уже распались, а яркий флоккул и магнитные связи остались (рис. 6). Анализ показал, что эта трансэкваториальная структура существовала как минимум на протяжении одного оборота: в предыдущем 2129 обороте на месте АО № 1618 располагалась небольшая АО № 1600, соединявшаяся трансэкваториальными петлями с уже упомянутой АО № 1598 (ветвь КА 24S10, АО

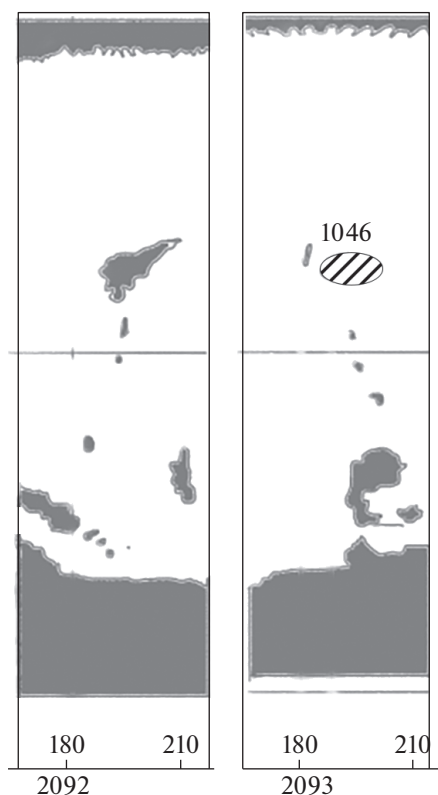


Рис. 3. а — фрагмент синоптической карты солнечной поверхности в 2092 обороте, б — тот же фрагмент в 2093 обороте. Черным цветом затушеваны КД, эллипсом показано положение АО № 11046.

№ 1620), где произошла одна из немногих в цикле гамма-вспышка [22, 28]. В 10° к западу от АО № 1600 наблюдалась крупная одиночная АО 1596. Еще одна гамма-вспышка произошла в рассматриваемой АО № 1618. Таким образом, трансэкваториальная система (КАО) из двух компонентов, включавшая АО № 1618, произвела в 2129–2130 оборотах две гамма-вспышки из 31, наблюдавшихся в цикле.

АО №№ 1652 и 1654. Эти две АО образуют КАО, соединены корональными петлями. Кроме того, АО 1654 связана магнитными петлями с небольшой АО 1656, расположенной к северо-востоку от нее. Перечисленные группы пятен, образующие КАО, показаны на рис. 7. АО № 1656 находится точно на месте упомянутой выше АО № 1596 (оборот 2129).

АО № 1726. Крупная биполярная АО № 1726 (максимальная площадь 1000 мдп) возникла в 2136 обороте. На снимке АО ИГУ от 21.04.2013 видно, что к западу видна еще одна небольшая группа пятен, не отмеченная в перечне АО NOAA. С этой областью АО № 1726 образовывала КАО. В следующем обороте на месте АО № 1726 пятен уже не было, но сохранилась магнитная корональная биполярная структура (рис. 8).

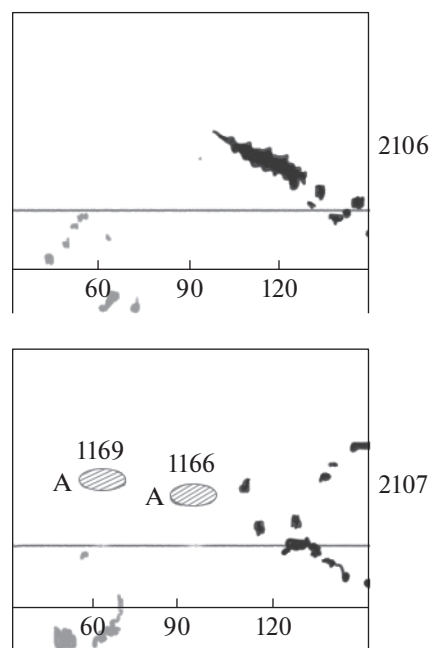


Рис. 4. а — фрагмент синоптической карты солнечной поверхности в 2106 обороте, б — в 2107 обороте. Черным цветом затушеваны КД, эллипсами показано положение ААО №№ 1166 и 1169.

АО № 1745 связана корональными петлями с АО № 1744. В предыдущем обороте на месте АО 1745 появлялась на один день АО, отмеченная обсерваторией ИГУ в составе КАО с АО 1726.

АО № 1748 связана низкими квазигоризонтальными петлями с остаточными структурами АО № 1726 (рис. 8), отличается обратным наклоном оси группы пятен по отношению к экватору. Здесь произошла серия вспышек класса X. Входит в состав разновозрастного КАО, включающего в себя АО №№ 1748, флоккул 1726, АО №№ 1745 и 1744.

АО № 2158 генерировала две вспышки X-класса, в том числе одну гамма-вспышку. На рис. 9 видна система высоких тонких петель, протягивающихся к востоку, флоккулу (остаточным полям) на месте АО 2139, наблюдавшейся в предыдущем обороте 2153 (разновозрастный КАО). К юго-западу через экватор находится АО № 2157, но трансэкваториальные петли, соединяющие эти АО, не видны.

АО № 2672. Одиночная крупная группа пятен. К востоку в 20° был флоккул, судя по магнитограмме — остатки небольшой биполярной АО. В предыдущем обороте здесь также не наблюдались пятна.

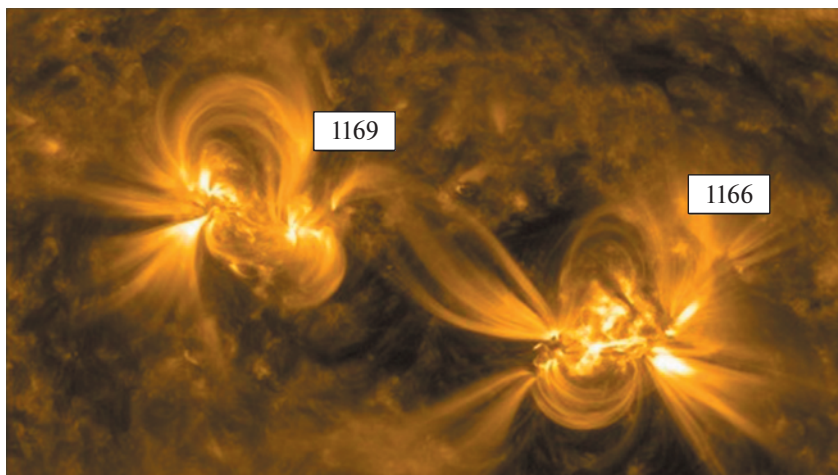


Рис. 5. Вспышечные активные области №№ 1169 и 1166 соединены корональными петлями. Снимок 10.03.2011, обсерватория SDO, 17.1 нм.

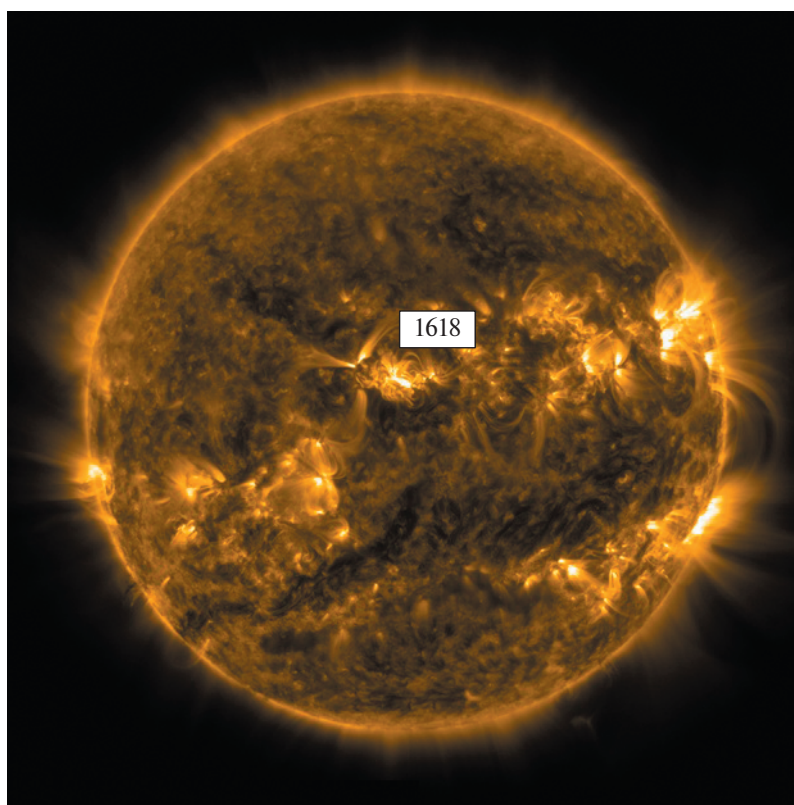


Рис. 6. Вспышечная активная область № 1618 соединена корональными петлями с областью в южном полушарии. Снимок 22.11.2012, обсерватория SDO, 17.1 нм.

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В 24 цикле солнечной активности практически все АО, которые генерировали вспышки классов М и X, наблюдались в составе комплексов активности — либо в ядрах, либо в ветвях. В то же время выделены 13 АО, которые не могут быть отнесены

по формальным признакам к разряду входящих в состав КА. Изучение этих активных областей показало, что все они входили в состав КАО, существовавших на протяжении не трех кэррингтоновских оборотов подряд, а как правило, одного. Так, в состав КАО входили АО №№ 1069, 1166–1169, 1652–1654. В этих случаях системы коро-

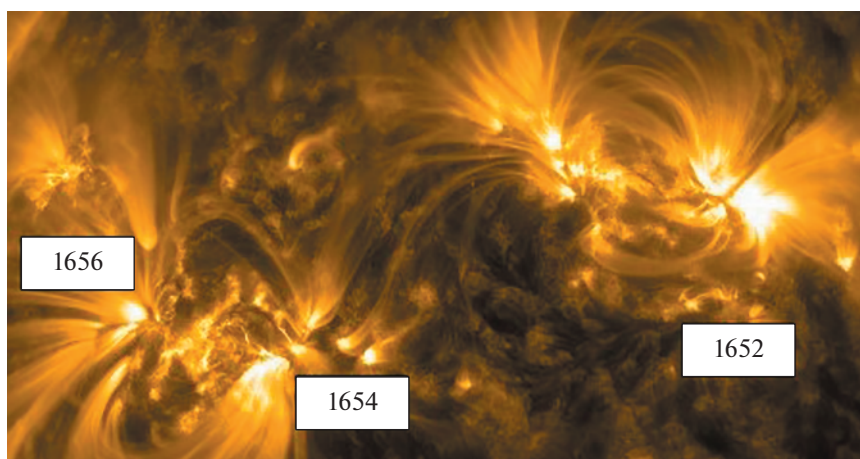


Рис. 7. Вспышечная активная область № 1654 соединена корональными петлями с АО 1652 и 1656. Снимок 12.01.2013, обсерватория SDO, 17.1 нм.

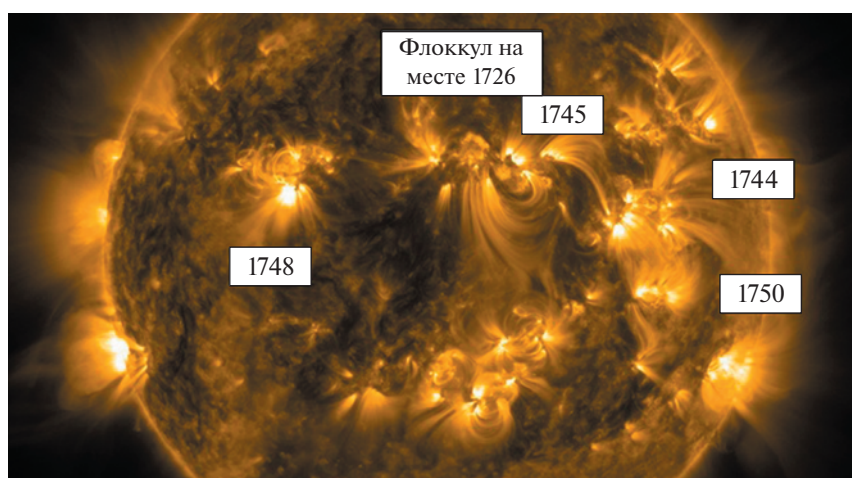


Рис. 8. Вспышечная активная область № 1745 соединена корональными петлями с АО 1744. К востоку от АО № 1745 находится флоккул, оставшейся от АО № 1726. Снимок 18.05.2013, обсерватория SDO, 17.1 нм.

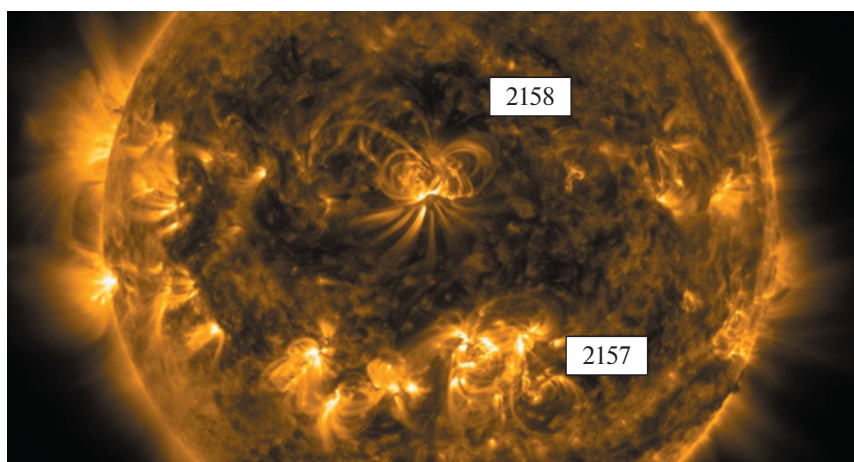


Рис. 9. Вспышечная активная область № 2158. Снимок 11.09.2014, обсерватория SDO, 17.1 нм.

нальных петель, соединявших активные области, были ярко выражены.

В случае АО № 1726 (на месте этой АО в следующем обороте наблюдались АО №№ 1745 и 1748) АО с пятнами могла соединяться петлями с менее ярко выраженной АО — старым флоккулом. Судя по морфологии и магнитограммам SDO, речь может идти об остатках небольшой АО, развивавшейся во время пребывания на обратном по отношению к земному наблюдателю полушарии Солнца. В этих случаях связи через корональные петли у ААО с более старой областью, выраженной в виде флоккула, сохранились. Аналогичные, несколько менее ярко выраженные системы реализованы в случаях КАО, состоящих из АО с пятнами и флоккула, — № 2158, 2672.

Особый интерес представляют случаи, когда вспышечная область соединялась трансэкваториальными корональными петлями с АО в противоположном (южном) полушарии (АО № 1046, 1618). В последнем случае трансэкваториальная система существовала на протяжении двух оборотов. Наконец, АО № 1041 в начале цикла обладала признаками типичного небольшого ядра КА: на тех же кэррингтоновских координатах в предыдущем обороте располагалась АО № 1039. Но эта система не была отнесена к разряду КА, поскольку, по определению, в ядре КА должна наблюдаться активность пятен в течение минимум трех оборотов подряд [20].

Важным свойством всех изученных АО оказалась явно не случайная связь с обязательно близко находящейся КД. Отмечены случаи, когда АО возникала на конце длинной КД, либо в месте, охваченном КД в виде дуги. Отмечен случай возникновения ААО прямо на месте КД, наблюдавшейся в предыдущем обороте. Таким образом, может быть выдвинута гипотеза о единой физической системе, включающей в себя КД и особую АО, возникающую на месте КД либо рядом с ней.

Еще раз отметим общие свойства рассмотренных вспышечных АО.

1. Все эти АО сформировались вблизи КД или прямо на месте недавно существовавшей КД.

2. Почти все эти АО являлись элементами КАО, будучи связаны через ярко выраженные корональные петли либо с другими АО, либо с уже распадающимися АО (старыми флоккулами). Исключение составляет высокоширотная АО № 1069, для которой не просматривается связь с соседними АО.

3. Все эти АО входят в популяцию достаточно крупных групп пятен, у которых скорость, как роста площади, так и скорость ее уменьшения после достижения максимума, заметно выше, чем у “обычных” АО, либо у АО, входящих в состав ядер либо ветвей КА.

4. Все указанные АО были отобраны по признаку высокой вспышечной активности — они дали сильные вспышки, сопровождавшиеся выбросами корональной массы. Все вспышки 24 цикла, сопровождавшиеся гамма-излучением и происшедшие вне КА, произошли в АО данной популяции.

С точки зрения авторов, оправдана гипотеза о том, что три первые перечисленные свойства рассмотренных АО являются значимыми факторами, определяющими их четвертое свойство — высокую вспышечную активность. По-видимому, для обеспечения способности АО генерировать сильные вспышки требуются все три фактора. Как правило, но далеко не всегда, эти факторы (не обязательно все) реализуются в КА. Вероятно, поэтому значительная доля всех сильных вспышек на Солнце происходит в ядрах (большой частью), либо в ветвях КА. В этих существующих на протяжении нескольких солнечных оборотов структурах накапливается энергия последовательно всплывающих в одном и том же месте магнитных полей, формируются сложные многоуровневые арочные конфигурации, в результате процессов пересоединения формируются неравновесные системы с токовыми слоями, что приводит к мощным вспышкам.

В то же время в некоторых КА не реализуется весь набор необходимых условий для генерации сильных вспышек, поэтому принадлежность АО к КА дает сравнительно высокую вероятность высокого вспышечного потенциала КА, но не гарантирует его. По-видимому, в популяцию ААО попали (в том числе) короткоживущие КА, по какой-то причине не сохранившие стабильный канал, по которому длительное время всплывали бы новые порции магнитного поля, и разрушившиеся, не достигнув возраста в 3 оборота.

Согласно интерпретации авторов, большая часть аномальных АО представляет собой КАО, включая трансэкваториальные, в которых АО оказались связанными друг с другом высокими корональными петлями. По-видимому, эти структуры, типичные, как правило, для долгоживущих КА, в данном случае возникли в отсутствие глубинного канала, достигающего глубоких слоев конвективной зоны. Судя по всему, здесь мы наблюдали АО, сформировавшиеся вблизи поверхностных слоев конвективной зоны, подобно “обычным” АО либо АО в ветвях КА, — в отличие от АО в ядрах КА. Но сформировавшиеся системы корональных арок, объединяющих две-три АО в КАО, обеспечили условия для сильных вспышек.

По-видимому, близкие КД, обязательно присутствовавшие поблизости (и даже, ранее, на месте) аномальных АО, тоже являются значимым фактором, обеспечивающим высокий вспышеч-

ный потенциал таких систем. Авторы планируют посвятить этому вопросу отдельное исследование.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны В.М. Томозову за полезные обсуждения и замечания.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа поддержана Минобрнауки России (госзадание FZZE-2020-0017, FZZE-2020-0024).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *H. W. Dodson and E. R. Hedemann*, Solar Phys. **113**, 401 (1970).
2. *В. Ф. Чистяков*, Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца **95**, 70 (1988).
3. *А. В. Боровик, Д. Ю. Мячин, А. М. Уралов*, Известия КрАО **112**, 38 (2016).
4. *Г. Смит, Э. Смит* Солнечные вспышки (Москва, Мир, 1966).
5. *А. Т. Алтынцев, В. Г. Банин, Г. В. Куклин, В. М. Томозов*, Солнечные вспышки (Москва, Наука, 1982).
6. *Ю. И. Витинский, М. Копецкий, Г. В. Куклин*, Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца (М.: Наука, Гл.ред.физ.мат.лит., 1986).
7. *В. Н. Ишков*, Изв. РАН, сер. Физ. **62**, 1835 (1998).
8. *H. Kiunzel*, Astron. Notes **258**, 271 (1960).
9. *Е. А. Макарова, Н. Г. Бочкарев, Г. А. Порфирьева, А. Б. Делоне, Г. В. Якунина*, Труды ГАИШ **71**, 107 (2001).
10. *М. Ю. Савинкин, В. И. Сидоров, С. А. Язев*, Солнечно-земная физика, вып. 12, 8 (2008).
11. *A. A. Golovko, G. V. Kuklin, A. V. Mordvinov, and V. M. Tomozov*, Solar Maximum Analysis. Additional Issue.: Proc. of the intern. Workshop (Irkutsk, USSR, 17–24 June, 1985), Nauka, Sib. Division, 1988, pp. 278–290.
12. *V. Bumba, R. Howard*, Astrophys. J. **141**, 1502 (1965).
13. *V. Gaizauskas, K. L. Harvey, J. W. Harvey, and C. Zwaan*, Astrophys. J. **265**, 1056 (1983).
14. *В. Н. Ишков, Э. И. Могилевский*, Солнечная активность **9**, 3 (1983).
15. *V. G. Banin, A. V. Borovik, and S. A. Yazev*, Contrib. Astron. Obs. Skalnat Pleso **15**, 289 (1986).
16. *В. Н. Обридко* Солнечные пятна и комплексы активности (М.: Наука, 1985).
17. *В. Н. Обридко, Ю. А. Наговицын* Солнечная активность, цикличность и методы прогноза (СПб.: Изд-во ВВМ, 2017).
18. *Э. И. Могилевский, Н. С. Шилова*, Известия КрАО **94**, 60 (1998).
19. *В. Г. Банин, А. В. Боровик, С. А. Язев*, Солнечные данные **5**, 82 (1988).
20. *S. A. Yazev*, Astronomy Reports **59**, 228 (2015).
21. *E. S. Isaeva, V. M. Tomozov, and S. A. Yazev*, Astronomy Reports **64**, 58 (2020).
22. *V. M. Tomozov, S. A. Yazev, E. S. Isaeva*, Astronomy Reports **64**, 722 (2020).
23. *E. S. Isaeva, V. M. Tomozov, and S. A. Yazev*, Astronomy Reports **62**, 243 (2018).
24. *В. Г. Банин, С. А. Язев, Г. М. Хмыров*, Солнечные данные **3**, 116 (1991).
25. The Solar Region Summary (SRS): <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-region-summary>.
26. Ядра комплексов активности на солнце в 24 цикл солнечной активности. С.А. Язев: http://ru.iszf.irk.ru/images/f/f2/000_ТАБЛИЦА_КА_В_24_ЦИКЛЕ_для_сайта_ИС-ЗФ_СО_РАН.doc.
27. *W. Livingston, M. Penn*, Eos Trans. AGU., 90, 257–258, (2009).
28. *G. H. Share, R. J. Murphy, S. M. White, A. K. Tolbert, B. R. Dennis, R. A. Schwartz, D. F. Smart, and M. A. Shea*, Astrophys. J. **869**, 182 (2018).