

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Иркутский государственный университет»

На правах рукописи



УДК 523.98

ИСАЕВА Елена Сергеевна

**СТАТИСТИКА ВСПЫШЕК В КОМПЛЕКСАХ АКТИВНОСТИ
НА СОЛНЦЕ**

1.3.1 – физика космоса, астрономия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Иркутск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский государственный университет»

Научный руководитель:

Язев Сергей Артурович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ИГУ»), директор астрономической обсерватории, профессор ИГУ.

Официальные оппоненты:

Обридко Владимир Нухимович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова Российской академии наук РАН (ИЗМИРАН), ведущий научный сотрудник.

Боровик Александр Васильевич, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного знамени Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЗФ СО РАН), старший научный сотрудник.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук (ГАО РАН), г. Санкт-Петербург.

Защита состоится «1» июня 2023 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета 24.1.197.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Трудового Красного знамени Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, расположенном по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126А, ИСЗФ СО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте <http://iszf/irk/ru> и в библиотеке ИСЗФ СО РАН.

Автореферат разослан «_____» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



Ю. В. Ясюкевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Актуальность работы связана с необходимостью уточнения физических механизмов и повышения качества прогноза сильных солнечных вспышек. Группы солнечных пятен, относящиеся к одинаковым классам с точки зрения классической цюрихской классификации, могут проявлять себя по-разному с точки зрения интенсивности генерации сильных вспышек – от нулевой до очень высокой. Высокая дифференциация уровня вспышечной активности сходных групп пятен позволяет сделать вывод о том, что существует, как минимум, еще один дополнительный неизвестный фактор, воздействующий на вспышечный потенциал активной области. В качестве такого гипотетического фактора в работе рассмотрена принадлежность (или непринадлежность) группы пятен к комплексам активности.

По сути, речь идет об исследовании и последующем использовании нового прогностического признака, который проявляется в повышенной способности активных областей, развивающихся в составе комплексов активности (далее – КА), к генерации сильных солнечных вспышек. В рамках решения этой задачи оказалось актуальным определение алгоритма идентификации КА, позволяющего разделять популяцию групп солнечных пятен на принадлежащие к комплексам активности и не принадлежащие к ним. Проблема заключается в том, что понятие КА, несмотря на большое количество работ разных исследователей (а возможно, как раз поэтому) остается не устоявшимся окончательно, – разные авторы вкладывают в это понятие разный смысл. Поэтому актуальным для решения поставленной задачи явилось уточнение определения КА, идентификация всех КА на протяжении 24-го цикла солнечной активности, составление соответствующих каталога и базы данных для дальнейшего сравнительного анализа вспышечной активности групп пятен внутри КА и за их пределами.

Цель работы

Цель работы заключалась в проверке гипотезы об особой роли КА на Солнце в процессе генерации крупных вспышек.

Для достижения этой цели были решены следующие задачи:

1. Составление синоптических карт пятенной активности Солнца за период 2009–2019 гг. (24 цикл солнечной активности) с использованием мировой сети данных и данных астрономической обсерватории ИГУ.

2. Идентификация КА по синоптическим картам пространственного распределения пятен на солнечной поверхности, создание каталога КА, включая их вспышечную активность, и соответствующей базы данных.

3. Анализ взаимного пространственного расположения КА и солнечных вспышек разных типов (сильные протонные события, сильные рентгеновские вспышки, гамма-вспышки, вспышки с длительным спадом излучения (LDE-события) на солнечной поверхности).

4. Сравнение вспышечного поведения активных областей в 24 цикле с другими циклами.

5. Анализ причин повышенной вспышечной активности в отдельной немногочисленной популяции активных областей, расположенных вне КА.

6. Анализ вклада корональных дыр, расположенных вблизи КА, в процессы генерации вспышек.

7. Формулирование гипотезы, объясняющей повышенную вспышечную активность активных областей в составе КА.

Научная новизна

1. Впервые идентифицированы КА в 24 цикле солнечной активности в соответствии с оригинальным алгоритмом, составлен каталог, создана база данных, вычислен вспышечный индекс для всех активных областей, входящих в состав КА.

2. Установлено, что значительная часть (более 80%) сильных солнечных вспышек разных типов наблюдается в активных областях, развивающихся в составе КА.

3. Выделен редкий класс особых активных областей, развивающихся вне КА, которые, тем не менее, отличаются повышенной вспышечной активностью. Показано, что такие образования связаны с немногочисленной популяцией короткоживущими КА.

4. Показано, что все КА, где происходили сильные протонные вспышки, а также гамма-вспышки, находились рядом с корональными дырами.

5. Установлено, что индекс «мощность КА» монотонно снижается от 21 к 24 циклу солнечной активности.

Научная и практическая значимость

В ходе работы выявлен ряд закономерностей структуры и эволюции КА, а также особенностей вспышечной деятельности активных областей в составе КА. Созданный и продолжающийся каталог ядер КА может быть использован специалистами в области гелиофизики для анализа проявлений солнечной активности и совершенствования методики прогноза крупных геоэффективных событий на Солнце. Результаты, полученные в диссертации, могут быть применены для модернизации существующих моделей и механизмов солнечной активности.

Положения, выносимые на защиту

1. Закономерность возникновения вспышек, выраженная в повышенной вспышечной активности комплексов активности. 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.

2. Закономерности развития КА в течение четырех (21-24) циклов, распределение продолжительности существования, вариации числа КА в течение цикла. В вариациях индексов, описывающих КА, проявляется правило Гневышева-Оля (в нечетных циклах значение этих параметров больше, чем в чётных). Отмечен систематический спад вспышечной активности КА в течение четырех циклов.

3. Факт обязательного присутствия корональных дыр вблизи мест локализации протонных и гамма-вспышек в КА в 24 цикле, который рассматривается как важный (если не обязательный) признак повышенного вспышечного потенциала активной области. Обоснована гипотеза о том, что выход вспышечных частиц из КА в гелиосферу обусловлен существованием долгоживущих магнитных каналов, позволяющих обеспечить перенос ускоренных вспышкой частиц в пограничную область открытой магнитной структуры корональных дыр.

4. Феноменологическая модель связи КА, сильных вспышек и корональных выбросов массы на Солнце, основанная на влиянии сложной крупномасштабной структуры магнитного поля КА.

5. Базы данных КА, вспышек в КА в 24 цикле солнечной активности, включающие данные об активных областях в составе КА и их вспышечную деятельность.

Достоверность результатов

Полученные в ходе работы результаты согласуются с результатами, полученными другими методами, соответствуют теоретическим предположениям и выводам других исследований.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на следующих международных и всероссийских конференциях:

1. Всероссийская астрономическая конференция «Небо и Земля», посвященная 85-летию астрономической обсерватории ИГУ, ИГУ, Иркутск, 2016.
2. Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике, ИСЗФ СО РАН, Иркутск, 2017.
3. XII Российско-монгольская международная конференция, Институт геофизики и астрономии МАН, Улан-Батор, 2018.
4. XIII Российско-монгольская международная конференция, ИСЗФ СО РАН, Иркутск, 2019.
5. Всероссийская астрономическая конференция «Небо и Земля», посвященная 90-летию астрономической обсерватории ИГУ, ИГУ, Иркутск, 2021.
6. Всероссийская астрономическая конференция «Астрономия в эпоху мультиволновых исследований», 2021.
7. Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике, ИСЗФ СО РАН, Иркутск, 2022.

Личный вклад автора

Все представленные в диссертации результаты получены автором лично. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора. Подготовка полученных результатов к публикации проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Автор принимала участие в мониторинге солнечных пятен, проводимом астрономической обсерваторией ИГУ, лично проводит полную обработку фотогелиограмм, ведет каталог проявлений солнечной активности в 24–25 циклах, является основным соавтором каталога комплексов активности и их вспышечной активности. Автором были созданы синоптические карты для исследования локализации вспышек по отношению к расположению КА и корональных дыр.

Публикации по теме диссертации

Материалы диссертации опубликованы в 15 печатных работах, из них шесть статей опубликовано в рецензируемых журналах, включенных в международные библиографические базы данных, три свидетельства о государственной регистрации баз данных, а также семь статей и тезисов в сборниках трудов конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 114 наименований. Общий объем диссертации – 134 страниц, включая 49 рисунков и 15 таблиц.

Содержание работы

Во введении представлена общая характеристика работы – приведено ее обоснование, раскрыта актуальность темы исследований, сформулированы цель работы и решавшиеся задачи, описаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов, перечислены положения, выносимые на защиту, оценена степень достоверности полученных результатов, указано, где и когда проводилась апробация работы, сделана оценка личного вклада автора, приведен список публикаций автора по теме диссертации, кратко описано содержание диссертации по главам.

Первая глава содержит описание данных астрономических наблюдений солнечных пятен. Приведена применявшаяся в работе методика изучения вспышечных проявлений КА на Солнце, основанная на анализе данных наблюдений [4, 6] Приведен краткий обзор существующих представлений о феномене КА, обоснован подход, в рамках которого КА рассматриваются как области постоянного пятнообразования, не смещающиеся в кэррингтоновской системе координат на протяжении, как минимум, двух солнечных оборотов.

Во введении к главе (1.1) кратко описано содержание главы.

В разделе 1.2 описаны данные использовавшихся в работе наблюдений солнечных пятен. В их числе данные из бюллетеней «Солнечные данные» и «Solar Geophysical Data», данные космических обсерваторий SOHO и SDO, а также данные собственных наблюдений солнечных пятен, выполненных в астрономической обсерватории ИГУ в Иркутске в течение 24 цикла солнечной активности, на основе которых организован мониторинг КА [4].

В частности, в подразделе 1.2.1 кратко описаны история наблюдений солнечных пятен в Иркутске, а также наблюдения на солнечном телескопе астрономической обсерватории ИГУ и методика обработки этих наблюдений, выполненной автором. В подразделе 1.2.2 описана созданная автором база данных о солнечных пятнах в 24 цикле по результатам наблюдений в Иркутске.

В разделе 1.3 описана идентификация КА на Солнце с помощью методики площадок длительной активности, предложенной В.Г.Баниным и С.А.Язевым [1]. В подразделе 1.3.1 указаны достоинства и недостатки этой методики, описано её применение для выделения КА в 24 цикле по авторским синоптическим картам, на которых были отражены расположение пятен, контуры проекций корональных дыр на солнечную поверхность, а также показана локализация сильных вспышек.

В подразделах 1.3.2 и 1.3.3 описаны созданная автором база данных «Комплексы активности в 24 цикле», «Протонные вспышки в комплексах активности», приведены их опции. В разделе 1.4 описаны синоптические карты, созданные автором для анализа статистической связи КА, корональных дыр и сильных вспышек.

В разделе 1.5 приведены выводы к главе 1. Данные наблюдений, систематизированные в каталогах и базах данных, использованы для исследования закономерностей развития КА в контексте их вспышечной активности, изложенных в последующих главах.

Изложен метод площадок длительной активности, предложенный в Институте солнечно-земной физики СО РАН В.Г.Баниным и С.А.Язевым [1] с помощью которого осуществляется идентификация ядер КА – областей постоянного пятнообразования, не смещающихся в кэррингтоновской системе координат. Описаны научно-методические основы мониторинга КА, выполнявшегося, в частности, с помощью солнечного телескопа астрономической обсерватории ИГУ в течение 24 цикла солнечной активности. Вся обработка наблюдений и их систематизация выполнена автором. Приведены данные о применявшейся методике обработки данных наблюдений и последующей идентификации КА, реализуемой с активным участием автора в астрономической обсерватории ИГУ. Представлен составленный с активным участием автора каталог КА в 24 цикле солнечной активности, приведено описание указанного каталога, а также баз данных и рабочих синоптических карт солнечной активности, созданных автором. Данные, систематизированные в каталоге, использованы для исследования закономерностей развития КА в контексте их вспышечной активности, изложенных в последующих главах.

Вторая глава содержит результаты исследования связи КА с различными типами рентгеновских вспышек.

Раздел 2.1 содержит краткую аннотацию главы.

В разделе 2.2 описаны результаты идентификации КА в первой половине 21 цикла (1976-1980 гг). [8,13] С использованием описанной в предыдущей главе методики выделены КА в первой половине 21 цикла [7]. Это позволило завершить каталогизацию КА на протяжении четырех циклов солнечной активности (21–24). Итоги приведены в таблице 1.

Таблица 1. Ядра комплексов активности в 21-24 циклах

Номер цикла	Северное полушарие	Южное полушарие	Всего
21	61	72	133
22	52	52	104
23	69	77	146
24	64	50	114

В частности, выделена заметная северно-южная асимметрия в развитии КА в течение 21 цикла (рис. 1).



Рис. 1. Вариации коэффициента северно-южной асимметрии расположения КА в 21-м цикле солнечной активности

Определены параметры КА в четырех циклах солнечной активности, приведенные в таблице 2.

Таблица 2. Параметры ядер КА в 21-24 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
1	2	3	4	5	6	7
21	137	118	5,89	1,18	873	7,53
22	130	101	4,31	1,11	613	6,07
23	168	124	4,49	1,09	866	6,98
24	146	107	5,27	1,06	583	5,44

Среднее число ядер КА, наблюдаемых в течение одного оборота (столбец 4), было максимальным в 21 цикле (5,89). Средняя удельная мощность ядра КА в обороте монотонно уменьшается от цикла к циклу. [8,14] При расчете значений этого параметра учитывались только те обороты, в которых на солнечном диске наблюдалось хотя бы одно ядро КА. Так было не всегда: в 21 цикле отмечены 19 «нулевых» в указанном смысле оборотов из 137, в 22 цикле – 29 из 130, в 23 цикле – 44 из 168, в 24 цикле КА отсутствовали в 39 оборотах из 146. В начале цикла количество «нулевых» (без ядер КА) оборотов составило соответственно 6 в 21 и 22 циклах, 14 в начале 23 цикла и 13 в начале 24 цикла. Таким образом, по сравнению с 21 и 22 циклами, первые КА в 23 и 24 циклах появились с заметной задержкой по отношению к моменту начала цикла, определяемому по сглаженной кривой среднемесячных значений чисел Вольфа [5]. Выявлена тенденция к снижению интегральной мощности ядер КА (столбец 6). Определена продолжительность существования ядер КА в 21 цикле (максимум распределения – 4 солнечных оборота. От цикла к циклу монотонно уменьшаются мощность КА, а также средняя продолжительность их существования и число одновременно наблюдаемых ядер КА. Динамика этих параметров не противоречит гипотезе о том, что Солнце вступает в эпоху «низких циклов» [3]. Отмечено соблюдение правила Гневнышева-Оля в параметрах, описывающих КА.

В разделе 2.2 приведены результаты изучения статистики солнечных вспышек различных классов, имеющих отношение к КА. Анализу подверглись все рентгеновские вспышки классов начиная с M0, происшедшие в течение текущего 24 цикла солнечной активности в период с января 2009 по декабрь 2018 г. включительно.

В подразделе 2.2.1 приведены статистические свойства активных областей, развивавшихся в указанный период времени. 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%). Динамика развития КА в 24 цикле показана на рис.2, где N_n – число ядер КА в северном полушарии, N_s – число ядер КА в южном полушарии, а N_r – номер солнечного оборота, для наглядности параметру N_s приписаны отрицательные значения. Выявлена и описана значительная северно-южная асимметрия в развитии КА, что не противоречит результатам исследований ряда предыдущих циклов [8].

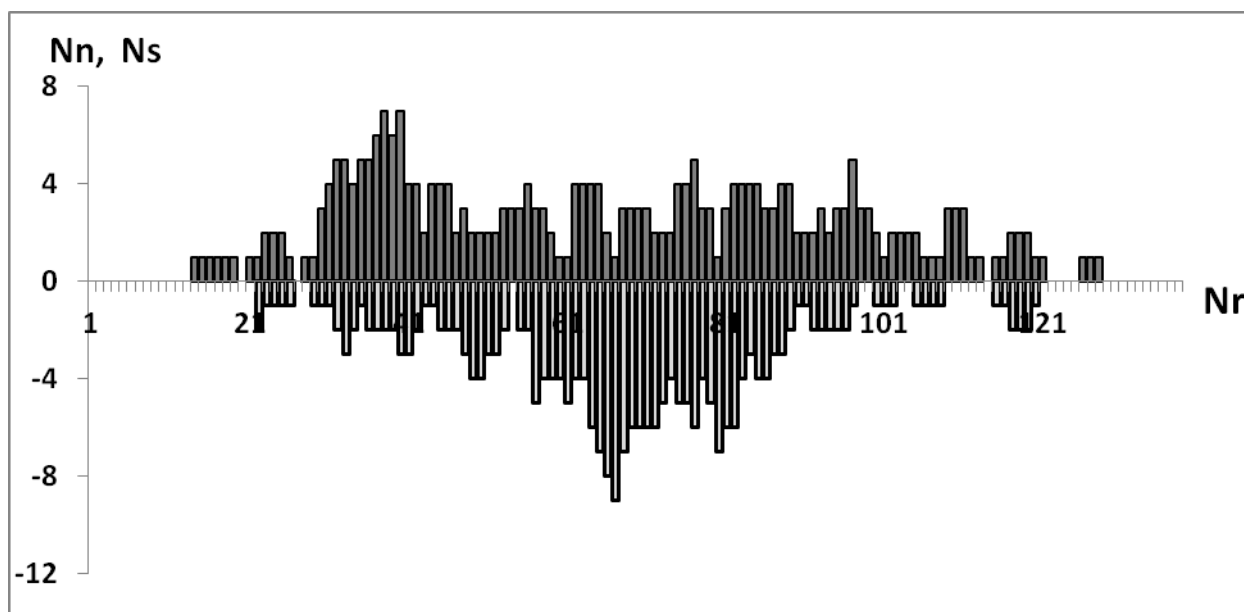


Рис. 2. Количество ядер КА в 24 цикле. Вверху – северное полушарие, внизу – южное полушарие

В подразделе 2.3.2 выполнен статистический анализ вспышечной активности в 24 цикле, включая оценку вклада КА в общий ход вспышечной активности. Рассматривались вспышки рентгеновских баллов начиная с M0 и выше. Вклад активных областей, находящихся в составе КА, в процессе 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 активные области, 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 (группах пятен, связанных высокими корональными петлями с КА в данном обороте, но не входящие в состав КА) этот показатель оказался существенно ниже (0,28), в активных областях вне КА – еще ниже (0,24).

Характеристики вспышечной активности в 24 цикле приведены в таблице 3. Энерговыделение вспышек выражено вспышечным индексом А.

Таблица 3. Вспышечная активность в 24 цикле

	Общее число АО N	Число вспышечных АО Nf	Число вспышек F	Среднее удельное число вспышек Nf / N	Вспышечный индекс А	Удельный индекс вспышки А/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

Всего 162 вспышки (21,8 % от общего числа) 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. Значения среднего удельного вспышечного индекса A/Nf соответственно для вспышечных групп пятен в ядрах КА, ветвях КА и вне КА оказываются иными – 1,66:0,69:0,98. Из 234 вспышечноактивных областей 179 (76%) имеют отношение к КА. В том числе 67 % произошли в активных областях, находившихся в ядрах КА, и 9% – областях, составляющих ветви КА.

В разделе 2.3 представлены результаты изучения популяции вспышек с длительным спадом рентгеновского излучения (LDE-события). Показано, что 87% всех таких вспышек в 24 цикле наблюдались в КА [10-12].

В разделе 2.4 обсуждаются механизмы связи рентгеновских вспышек на Солнце с комплексами активности [19]. Показано, что выявленные закономерности не противоречат концепции Наговицына и Осиповой [15] о том, что все группы пятен могут быть разделены на две независимые популяции SSG (Small Short-living Groups) и LLG (Large Long-living Groups),

которые разделяются по двум параметрам: продолжительности существования (короче либо дольше 5 суток) и напряженности магнитного поля (ниже или выше 2000 Гс). Обоснована гипотеза о том, что крупные долгоживущие группы пятен LLG во многом аналогичны популяциям активных областей, развивающимся внутри ядер КА, а небольшие короткоживущие группы пятен SSG преимущественно относятся к типу, не имеющему отношения к КА. Это не тождественные, но близкие понятия. Вероятно, активные области в ядрах КА формируются в глубине конвективной зоны, тогда как группы пятен вне КА и в ветвях КА – не глубоко (вблизи уровня фотосферы).

В разделе 2.5 приведены выводы к главе.

Третья глава посвящена вопросу связи сильных протонных вспышек с КА.

Раздел 3.1. представляет собой введение к главе.

В разделе 3.2 анализируется связь с КА популяции вспышек, воздействующих на природную среду, Вспышки, включенные в каталог [16], отбираются по числу событий с энергией частиц более 10 МэВ (более 10 регистраций частиц в секунду на квадратный сантиметр в единичном телесном угле на орбите Земли). Показано, что сильные потоки энергичных протонов связаны не только со вспышками, отличающимися высокими рентгеновскими баллами, но и со слабыми вспышками рентгеновского класса С. В то же время изучение популяции наиболее мощных (рентгеновского Х-класса) вспышек показывает, что далеко не все из них сопровождаются выходом больших потоков энергичных протонов в гелиосферу. В связи с этим можно утверждать, что степень «протонности» вспышки зависит не только от ее рентгеновского класса, но и от других факторов. В их числе рассматривались принадлежность АО к КА и близость корональной дыры (КД) [2].

В разделе 3.2 рассмотрена статистика связи вспышек рассматриваемого типа с КА в 21-24 циклах. В среднем 83,6% вспышек происходили в КА, 60% этих вспышек наблюдаются в течение первых трех оборотов существования КА.

В разделе 3.3 показано, что все вспышки рассматриваемого типа находились вблизи границ КД. В их числе 80% вспышек оказались на расстояниях ближе 240 Мм (рис. 3).

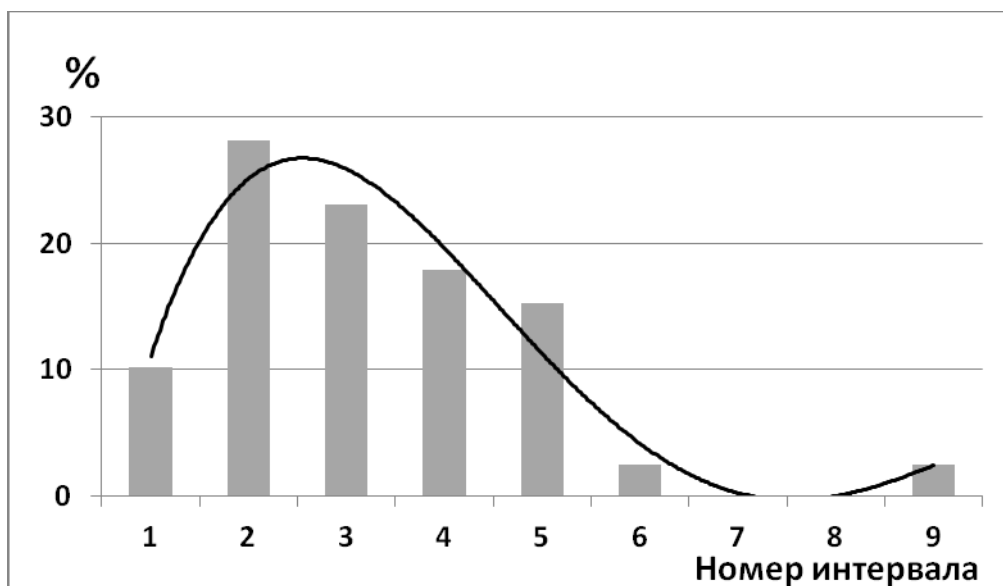


Рис. 3. Зависимость расстояния от вспышки до ближайшей корональной дыры в 24 цикле активности. Каждый интервал на оси абсцисс равен 60 Мм (несколько менее 5 гелиографических градусов)

Рассмотрена роль факторов корональных дыр (КД), КА и корональных выбросов массы (КВМ) в процессе выхода энергичных частиц вспышки в гелиосферу. Обоснована точка зрения, сводящаяся к тому, что именно в КА вблизи от КД реализуются условия, способствующие генерации потоков энергичных протонов. В частности, в КА наблюдается взаимодействие старых и новых магнитных полей, всплывающих из-под фотосферы в одном и том же месте, а открытая магнитная конфигурация близко расположенной КД обеспечивает выход в гелиосферу вспышечных потоков частиц [18].

В разделе 3.5 представлены выводы по результатам исследований, описанных в главе 3.

В четвертой главе изложены результаты исследования связи гамма-вспышек с КА в 24 цикле.

Раздел 4.1 представляет собой введение к главе, содержащее краткие сведения о гамма-вспышках на Солнце.

В разделе 4.2 приведен каталог гамма-вспышек в 24 цикле (31 событие) в котором указана связь вспышек с КА. 14 событий произошли в ядрах КА, 9 вспышек – в ветвях КА. Таким образом, 74% рассматриваемых вспышек оказались физически связанными с КА. 8 вспышек произошли в АО вне КА. Существенно, что 7 из 9 вспышек в ветвях КА произошли всего в двух АО: 5 в АО № 11429 и 2 – в АО № 11882. 8 гамма-вспышек вне КА возникли всего в четырех АО, в том числе 2 в АО № 11226, и 4 в АО № 11748. Эти

особенные в указанном смысле группы пятен рассмотрены в 5-й главе. С этой оговоркой констатируется, что подавляющее большинство гамма-вспышек (три четверти) происходили в АО, связанных с КА [17].

В разделе 4.3 приведены результаты исследования связи гамма-вспышек и КД. Показано, что все без исключения вспышки с гамма-излучением произошли в непосредственной близости от границ КД.

В разделе 4.4 рассмотрена качественная (феноменологическая) модель развития сильной вспышки в КА на Солнце, сопровождающаяся гамма-излучением и корональным выбросом вещества (КВМ), основанная на концепции «прорыва» магнитной структуры АО [9].

В разделе 4.5 обсуждается связь гамма-вспышек на Солнце с близостью КД. Показано, что для генерации гамма-вспышки статистически и в рамках обсуждаемой модели требуется выполнение следующих условий:

- наличие сильных магнитных полей, типичных для КА;
- наличие протяженного волокна активной области в КА (магнитный жгут, впоследствии порождающий КВМ);
- наличие вблизи вспышечного КА границы КД (процессы магнитного пересоединения на границе КА и КД инициируют вспышку, а сама зона открытого магнитного поля способствует выходу ускоренных частиц в корону и гелиосферу) [9, 14].

В разделе 4.5 приведены выводы к главе.

Пятая глава посвящена отдельному исследованию вспышечноактивных областей, находящихся за пределами КА. Количество таких активных областей, в которых наблюдались вспышки рентгеновских классов М и Х, оказалось равным 13. В разделе 5.2 рассмотрено развитие этих областей, в разделе 5.3 дано подробное описание динамики индивидуальных областей. Выполнено сравнение с результатами, представленными в работе [5]. В разделе 5.4 сформулированы выводы, где систематизированы следующие свойства рассмотренных АО:

1. Все эти активные области сформировались вблизи КД, либо прямо на месте недавно существовавшей КД

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

3. Все эти АО входят в популяцию достаточно крупных групп пятен, у которых как скорость роста площади, так и скорость ее уменьшения после

достижения максимума заметно выше, чем у «обычных» активных областей, либо у активных областей, входящих в состав ядер либо ветвей КА;

4. Все указанные АО были отобраны по признаку высокой вспышечной активности – они дали сильные вспышки, сопровождавшиеся КВМ. Все вспышки 24 цикла, сопровождавшиеся гамма-излучением и происшедшие вне КА, наблюдались в областях данной популяции.

В заключении сформулированы результаты диссертации.

1. Выполнена обработка данных наблюдений солнечных пятен, проводившихся в течение 24-го цикла солнечной активности. Данные систематизированы, каталогизированы, создана база данных.

2. Построены синоптические карты, на которых обозначено положение солнечных пятен, контуры корональных дыр, нанесены сильные солнечные вспышки. С помощью специальной методики выделены и каталогизированы КА в первой половине 21-го цикла и на протяжении 24 цикла. Определены основные параметры КА в четырех солнечных циклах.

3. Проанализирована статистическая связь КА на Солнце и солнечных вспышек с рентгеновскими классами выше M0 (744 события) в течение 24-го 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.

4. Показано, что вспышки на Солнце, которые сопровождались потоками частиц на орбите Земли, превышающими 10 частиц на квадратный сантиметр в секунду с энергией более 10 МэВ в 24 цикле, происходили преимущественно в КА (в 82%) и в 80% случаев не дальше, чем в 20 гелиографических градусах от ближайших КД. При этом рентгеновский класс вспышек плохо коррелирует с потоком протонов на орбите Земли. Обоснована гипотеза о том, что выход частиц в гелиосферу обусловлен существованием долгоживущих магнитных каналов, позволяющих обеспечить перенос ускоренных вспышкой частиц в пограничную область открытой магнитной структуры корональных дыр.

5. Проведен анализ мощных вспышечных событий из каталога Share и др. [17] с длительной фазой гамма-излучения с целью объяснения

особенностей импульсной и длительных фаз таких вспышек и выявления их связи с КА и КД. Показано, что 74% таких событий оказались тесно связанными с КА. Качественно продемонстрирована связь процессов ускорения частиц в ходе развития вспышки с изменениями магнитной топологии во вспышечной области и с эволюцией КВМ.

6. Показано, что активные области с высокой вспышечной активностью вне КА относятся к разряду сравнительно долгоживущих крупных групп пятен, отличающихся повышенной скоростью роста площади и находящихся вблизи КД. Эти области входят в состав КАО, соединяются с другими областями системами высоких корональных систем, включая трансэкваториальные. Часть таких активных областей ассоциируется автором с короткоживущими (менее 3 кэррингтоновских оборотов) КА, часть является компонентами КАО.

Основные результаты, представленные в диссертации, опубликованы в работах автора.

Список публикаций автора по теме диссертации

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных:

1. **Исаева Е. С.** Рентгеновские вспышки и комплексы активности на Солнце в фазе роста 24-го цикла/ Е. С. Исаева, С. А. Язев// Солнечно-земная физика. – 2013. – Вып. 22. – С. 3–11.
2. **Исаева Е. С.** «Протонные вспышки в комплексах активности на Солнце: причины и следствия»/ Е. С. Исаева, В. М. Томозов, С. А. Язев// *Астрономический журнал*. – 2018. – Т. 95, № 3. – С. 256–264.
3. **Исаева Е. С.** Рентгеновские вспышки и комплексы активности на Солнце в 24 цикле/ Е. С. Исаева, В. М. Томозов, С. А. Язев // *Астрономический журнал*. – 2020. – Т. 97, № 1. – С. 64–72.
4. Томозов В. М. Гамма-вспышки и комплексы активности на Солнце/ В. М. Томозов, С. А. Язев, **Е. С. Исаева** // *Астрономический журнал*. – 2020. – Т. 97, № 8. – С. 722–730.
5. Язев С. А. Комплексы активности на Солнце в 21 цикле солнечной активности / С. А. Язев, М. М. Ульянова, **Е. С. Исаева** // *Солнечно-земная физика*. – 2021. – Т. 7, № 4. – С. 3-10.
6. Язев С. А. Активные области на Солнце с повышенной вспышечной активностью в 24 цикле / С. А. Язев, **Е. С. Исаева**, Ю. В. Ишмухаметова / *Астрономический журнал*. – 2021. – Т. 98, № 6. – С. 506–517.

Свидетельства о государственной регистрации баз данных:

1. **Исаева Е. С.** Комплексы активности в 24 цикле/ Е. С. Исаева, С. А. Язев. – Св-во о рег. №2014621721. – Дата регистрации 11 декабря 2014 г.
2. **Исаева Е. С.** База данных «Данные о солнечных пятнах по наблюдениям астрономической обсерватории ИГУ» / Е. С. Исаева, В. В. Капленко, В. И. Красов, С. И. Расчетин, С. А. Язев. – Св-во о рег. № 2011621023. – Дата регистрации 28 февраля 2011 г.
3. **Исаева Е. С.** База данных «Протонные вспышки в комплексах активности» / Е. С. Исаева, С. А. Язев. – Св-во о рег. № 2017620340. – Дата регистрации 24 марта 2017 г.

Иные публикации, в том числе в трудах конференций:

1. **Исаева Е. С.** Наблюдения солнечных пятен в Астрономической обсерватории ИГУ/ Е. С. Исаева, В. В. Капленко, С. И. Расчетин, С. А. Язев // Избранные проблемы астрономии : материалы IV Всерос. астрон. конф. «Небо и Земля» / под ред. С. А. Язева. – Иркутск, 2016. – С. 158–165.
2. **Исаева Е. С.** О пространственно-временном расположении протонных вспышек на солнечной поверхности / Е. С. Исаева, В. М. Томозов, С. А. Язев // Тезисы докладов БШФФ-2017. – Иркутск, 2017. – С. 18.
3. **Исаева Е. С.** Рентгеновские вспышки в комплексах активности на Солнце / Е. С. Исаева, С. А. Язев // Солнечно-земные связи и геодинамика Байкальско-Монгольского региона: результаты многолетних исследований и научно-образовательная политика РАН : тр. XII Рос.-монг. междунар. конф. – Иркутск, 2018. – С. 17–18.
4. **Исаева Е. С.** Статистика солнечных вспышек в 24 цикле активности / Е. С. Исаева, В. М. Томозов, С. А. Язев // Солнечно-земные связи и геодинамика Байкало-Монгольского региона : тр. XIII Рос.-монг. междунар. конф. –Иркутск, 2019. – С. 10.
5. **Исаева Е. С.** 25-й цикл солнечной активности: первые 20 месяцев развития / Е. С. Исаева, С. А. Язев // Избранные проблемы астрономии: материалы V Всерос. астрон. конф. «Небо и Земля», посвящ. 90-летию астрономической обсерватории ИГУ. – Иркутск, 2021. – С. 87–93.
6. Yazev S. Activity Complexes on the Sun in cycle 24 / S. Yazev, V. Tomozov, E. Isaeva // Astronomy at the epoch of multimessenger studies, the VAK-2021. – Moscow, 2021. – P. 343–344.

Цитируемая литература

1. Банин В. Г. Площадки длительной активности на нисходящей ветви солнечного цикла № 21/ В. Г. Банин, С. А. Язев // Кинематика и физика небесных тел. – 1989. – Т. 5, № 4. – С. 62–68.
2. Исаева Е. С. Рентгеновские вспышки и комплексы активности на Солнце в фазе роста 24-го цикла / Е. С. Исаева, С. А. Язев // Солнечно-земная физика. – 2013. – Вып. 22. – С. 3–11.
3. Ишков В. Н. Космическая погода и особенности развития текущего 24-го цикла солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. – 2018. – Т. 58, № 6. – С. 785–800.
4. Капленко В. В. Наблюдения фотосферы на солнечном телескопе астрономической обсерватории ИГУ / В. В. Капленко, С. И. Расчетин, С. А. Язев, Д. В. Ерофеев // Солнечно-земная физика. – 2008. – Т. 1, № 12. – С. 76.
5. Обридко В. Н. Солнечная активность, цикличность и методы прогноза / В. Н. Обридко, Ю. А. Наговицын. – Санкт-Петербург : ВВМ, 2017. – 466 с.
6. Язев С. А. Программа наблюдений солнечной фотосферы в Иркутске на телескопе «Цейсс-150» / С. А. Язев, А. Н. Арсентьев, А. В. Дорофеев, Д. В. Семенов // Всероссийская конференция «Многоволновые исследования Солнца и современные проблемы солнечной активности» : сб. тез. докл. – САО РАН, Нижний Архыз. 28 сентября – 2 октября 2006 г. – С. 69.
7. Язев С. А. Комплексы активности на Солнце в 1980–2008 г. Комментарии к каталогу данных // Изв. ИГУ. Сер. Науки о Земле. – 2010 а. – Т. 3, № 2. – С. 217–225.
8. Язев С. А. Комплексы активности в циклах Швабе-Вольфа / С. А. Язев, А. В. Коротких, И. Г. Тарлюк // Солнечно-земная физика. – 2011. – № 19. – С. 3–9.
9. Язев С. А. Феномен комплексов активности на Солнце / С. А. Язев. – Иркутск : Изд-во ИГУ, 2014. – 377 С.
10. Antalova A. Long-Decay Soft X-Ray Flares. I. Region McMath 11 926, June 15, 1972 / A. Antalova, M. B. Ogir // Astron. Inst. Czechosl. – 1984. – Vol. 35. – P. 276–294.
11. Antalova A. Long-decay soft X-ray flares. II – Three-parallel-ribbon LDE flare, 1981 October 12, 06:15 UT / A. Antalova, M. B. Ogir // Bull. Astron. Inst. Czechosl. – 1986. – Vol. 37. – P. 344–358.
12. Antalova A. Long-decay soft X-ray flares / A. Antalova, M. B. Ogir // Bull. Astron. Inst. Czechosl. – 1988. – Vol. 39. – P. 97–105.
13. Isaeva E. S. Proton Flares in Solar Activity Complexes: Possible Origins and Consequences / E. S. Isaeva, V. M. Tomozov, S. A. Yasev // Astronomy Reports. – 2018. – Vol. 62, N 3. – P. 243–250.
14. Isaeva E. S. X-Ray Flares and Activity Complexes on the Sun in Solar Cycle 24 / E. S. Isaeva, V. M. Tomozov, S. A. Yasev // Astronomy Reports. – 2020. – Vol. 64, N 1. – P. 58–65.
15. Nagovitsyn Yu. A. Two populations of sunspots and secular variations of their characteristics / Yu. A. Nagovitsyn, A. A. Pevtsov, A. A. Osipova, A. G. Tlatov, E. V. Miletskii, E. Yu Nagovitsyna // Astronomy Letters. – 2016. – Vol. 42. – Iss. 10. – P. 703–712.
16. Solar Proton Events Affecting the Earth Environment. URL: <http://umbra.nascom.nasa.gov/SEP/>
17. Share G. H. Characteristics of Late-phase >100MeV Gamma-Ray Emission in Solar Eruptive Events / G. H. Share, R. G. Murphy, S. M. White [et al.] // Astrophys. J. – 2018. – Vol. 869. – P. 1–55.
18. Wang Y. -M. Coronal Holes, Jets, and the Origin of ³He-rich Particle Events / Y. -M. Wang, M. Pick, G. M. Mason // Astrophys. J. – 2006. – Vol. 639. – P. 495.
19. S. A. Yasev. Activity complexes on the sun in solar cycle 24// Astrophys. J. – 2015. – Vol. 59. – P. 228–237.

Подписано в печать 28.03.2023. Формат 60×90 1/16
Усл. печ. л. 1,3. Тираж 100 экз. Заказ 3322

ИЗДАТЕЛЬСТВО ИГУ
664082,г. Иркутск, ул. Лермонтова, 124