

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

УДК: 523.98
На правах рукописи

ИСАЕВА Елена Сергеевна

**СТАТИСТИКА ВСПЫШЕК В КОМПЛЕКСАХ АКТИВНОСТИ НА
СОЛНЦЕ**

(Специальность 1.3.1 – физика космоса, астрономия)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



Научный руководитель:
д.ф-м.н., профессор Язев С.А.

Иркутск - 2023

Содержание

Введение.....	4
Глава 1. Методика и использованные данные наблюдений.....	15
1.1 Введение.....	15
1.2 Данные наблюдений.....	16
1.2.1 Наблюдения солнечных пятен в Иркутске.....	16
1.2.2 База данных солнечных пятен в 24 цикле.....	26
1.3 Комплексы активности на Солнце и методы их идентификации.....	28
1.3.1 Идентификация комплексов активности.....	28
1.3.2 База данных «Комплексы активности на Солнце в 24 цикле».....	35
1.3.3 База данных «Протонные вспышки в комплексах активности».....	38
1.4 Синоптические карты.....	40
1.5 Выводы к главе 1.....	42
Глава 2. Рентгеновские вспышки и комплексы активности.....	43
2.1 Введение.....	43
2.2 Комплексы активности в 21 цикле солнечной активности.....	43
2.3 Рентгеновские вспышки в комплексах активности.....	53
2.3.1 Активные области в 24 цикле.....	54
2.3.2 Рентгеновские вспышки в комплексах активности.....	58
2.4 LDE-вспышки в 24цикле.....	62
2.5 Связь рентгеновских вспышек с комплексами активности.....	63
2.6 Выводы к главе 2.....	67
Глава 3. Сильные протонные вспышки и комплексы активности.....	69
3.1 Введение.....	69
3.2 Рентгеновские классы протонных вспышек.....	71
3.3 Протонные вспышки и комплексы активности.....	72

3.4 Протонные вспышки и корональные дыры.....	74
3.5 Выводы к главе 3.....	84
Глава 4. Гамма-вспышки и комплексы активности на Солнце.....	85
4.1 Введение.....	85
4.2 Вспышки с длительным гамма-излучением и комплексы активности.....	86
4.3 Вспышки с длительным гамма-излучением и корональные дыры.....	89
4.4 Развитие сильной вспышки в комплексе активности на Солнце.....	91
4.5 Связь гамма-вспышек с корональными дырами.....	98
4.6 Выводы к главе 4.....	102
Глава 5. Вспышки в активных областях за пределами комплексов активности.....	103
5.1 Введение.....	103
5.2 Активные области вне комплексов активности.....	105
5.3 Индивидуальные параметры аномальных активных областей.....	116
5.4 Выводы к главе 5.....	122
Заключение.....	125
Список использованной литературы.....	127

Введение

1 сентября 1859 г. английские астрономы Р.Кэррингтон и Р.Ходжсон впервые в истории человечества наблюдали вспышку на Солнце. Современные оценки позволяют утверждать, что это была самое мощное явление за все время наблюдений, вплоть до настоящего времени. Вспышка сопровождалась рядом сильных геофизических эффектов на Земле. Считается, что подобные явления на Солнце наблюдаются раз в 800 – 1000 лет [86; 102].

Кэррингтоновское событие 1859 г. относилось к редкому классу так называемых белых вспышек, которые наблюдаются в интегральном свете сравнительно редко – как правило, не более нескольких случаев за десятилетие. В XX веке, по мере развития техники астрономических наблюдений, выяснилось, что вспышки являются достаточно частыми событиями, тесно связанными с группами солнечных пятен (активными областями), а, следовательно, их число модулируется ходом солнечного цикла Вольфа-Швабе [32]. Начиная с 1926 г, вспышки периодически наблюдались в активных областях с помощью спектрогелиоскопов. В середине XX века в распоряжении гелиофизиков появились узкополосные интерференционно-поляризационные фильтры, позволявшие наблюдать Солнце в свете хромосферных линий, прежде всего линий водорода. В эпоху выполнения научной программы Международного геофизического года (МГГ, 1957-1958 гг. [13]), удачно совпавшего с максимумом самого «высокого» в истории наблюдений 19-го цикла солнечной активности, солнечными обсерваториями был выполнен цикл систематических (непрерывных) наблюдений Солнца. В этот период была развернута продолжающая свою работу по настоящее время сеть станций наблюдений (обсерваторий), ведущих непрерывный мониторинг солнечной, и в частности, вспышечной активности. В результате этого мониторинга, осуществлявшегося по единой программе, уже в 1960-ые годы стало ясно, что вспышки происходят на Солнце постоянно – их количество на видимом диске светила может достигать десятков в сутки [38]. При этом вспышки существенно

различаются по многим параметрам. Были предложены первые варианты классификации вспышек, в частности, введены оптические баллы, учитывавшие как площадь, так и яркость вспышек по наблюдениям в свете линии водорода Н-альфа [39]. Многие исследования были посвящены как феноменологии и статистике вспышек, так и поискам физических механизмов, происходящих во вспышках [15;7].

Новая эпоха в исследованиях вспышек началась в 1970-ые годы, когда были развернуты сначала эпизодические, а затем и регулярные наблюдения в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах на внеатмосферных обсерваториях. Измерения интенсивности локальных источников рентгеновского излучения, наблюдаемого во время вспышек, позволили использовать их как основной параметр для описания вспышек на Солнце [34]. Кроме того, детекторы, размещенные на спутниках, обеспечили возможность непосредственно фиксировать потоки заряженных частиц, выбрасываемых в гелиосферу во время, по крайней мере, некоторых вспышек [32] и измерять их параметры.

Исследование солнечных вспышек представляет большой интерес – как фундаментальный, так и прикладной. Известно, что в основе вспышек лежат магнитогидродинамические и электродинамические процессы, в результатах которых высвобождается энергия, запасенная в магнитных полях активных областей [40], однако многие детали этих процессов остаются невыясненными. В связи с этим условия, приводящие к генерации вспышек, требуют уточнения. Поэтому, несмотря на выделение целого ряда морфологических и количественных признаков вспышечной опасности, по состоянию на сегодняшний день качество прогноза солнечных вспышек, как и десятилетия назад, оставляет желать лучшего [32].

Что касается практической важности изучения вспышечных и сопутствующих явлений, то она связана с сильными проявлениями последствий вспышек в земных оболочках, включая геомагнитные бури и суббури, полярные сияния, вариации параметров атмосферного электрического поля, а также

эффекты в техносфере земной цивилизации (нарушения радиосвязи, наведение токов в электропроводящих системах, сбои в электронике и т.д.). Имеются данные о воздействиях солнечных вспышек и связанных с ними выбросов коронального вещества на живые организмы.

Таким образом, перед гелиофизиками стоит немало нерешенных задач. Задача, которая решалась в настоящей работе, сводилась к следующему.

Как известно, вспышки происходят в активных областях, вблизи солнечных пятен [10]. Немногочисленные случаи обнаружения вспышек вне групп пятен (так называемые беспятенные вспышки) [64; 41; 14; 19] в целом не изменяют этот вывод, поскольку даже в беспятенных вспышках задействованы магнитные поля старых (распадающихся) активных областей.

Тем не менее, исследования показали, что активные области существенно различаются между собой по уровню вспышечной активности. Существуют группы пятен, где вспышки совсем не происходят. В то же время есть активные области, способные генерировать целые последовательности мощных вспышек самых высоких рентгеновских классов. Убедительно показано [42], что, как правило, сильные вспышки происходят в группах пятен, которые развиваются в составе комплексов активности на Солнце. Целью настоящей работы явилось исследование связи комплексов активности на Солнце с сильными солнечными вспышками на материале 24 цикла солнечной активности, дополненном данными о других циклах.

Актуальность темы

Актуальность работы связана с необходимостью уточнения физических механизмов вспышек, а также повышения качества прогноза крупных солнечных вспышек. Группы солнечных пятен, относящиеся к одинаковым классам с точки зрения классической цюрихской классификации [39; 11], могут проявлять себя по-разному с точки зрения интенсивности генерации крупных вспышек – от нулевой до очень высокой. Высокая дифференциация уровня вспышечной

активности групп пятен, сходных с точки зрения цюрихской классификации, позволяет сделать вывод о том, что необходимо найти и учитывать, как минимум, еще один неизвестный дополнительный фактор, действующий на вспышечный потенциал группы пятен. 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, к генерации сильных солнечных вспышек. В рамках решения этой задачи оказалось актуальным определение алгоритма идентификации комплексов активности, позволяющего разделять популяцию групп солнечных пятен на принадлежащие к комплексам активности и не принадлежащие к ним. Проблема заключается в том, что понятие комплекса активности, 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 комплекса активности, идентификация всех комплексов активности на протяжении 24 цикла солнечной активности, составление соответствующих каталога и базы данных для дальнейшего сравнительного анализа вспышечной активности групп пятен в пределах комплексов активности и за их пределами.

Цель работы

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

Для достижения этой цели были решены следующие задачи:

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

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

3. Анализ взаимного пространственного расположения комплексов активности 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 высокой вспышечной активности в отдельной немногочисленной популяции активных областей вне комплексов активности.

6. Анализ роли корональных дыр вблизи комплексов активности в процессы генерации вспышек.

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

Научная новизна

1. Впервые идентифицированы комплексы активности 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 комплексов активности.

2. Установлено, что значительная часть (более 80%) солнечных вспышек разных типов в 24 цикле происходили в активных областях, развивающихся в составе комплексов активности.

3. Выделен редкий класс особых активных областей, развивающихся вне комплексов активности, отличающихся высокой вспышечной активностью. Показано, что такие образования связаны с короткоживущими комплексами активности, формально не подпадающими под определение комплекса активности.

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

5. Установлено, что мощность комплексов активности монотонно снижается от 21 к 24 циклу солнечной активности.

Научная и практическая значимость

. В ходе работы выявлен ряд закономерностей структуры и эволюции комплексов активности, а также их вспышечной деятельности. Созданный и продолжающийся каталог ядер КА может быть использован специалистами в области гелиофизики для анализа проявлений солнечной активности и совершенствования методики прогноза крупных геоэффективных возмущений 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 комплексов активности 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 комплексов активности 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 комплексов активности, вспышек в комплексах активности в 24 цикле солнечной активности, включающие данные об активных областях в составе комплексов активности (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 «Солнечно-земные связи и геодинамика Байкало-монгольского региона: результаты многолетних исследований и научно-образовательная политика», Институт геофизики и астрономии МАН, Улан-Батор, 2018
4. XIII Российско-монгольская международная конференция «Солнечно-земные связи и геодинамика Байкало-монгольского региона», 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.

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, ведёт 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 комплексов активности и корональных дыр.

Публикации по теме диссертации

Материалы диссертации опубликованы в 16 печатных работах, из них четыре статьи опубликованы в рецензируемых журналах, включенных в библиографическую базу данных Web of Science, одна статья в журнале, включенном в библиографическую базу данных SCOPUS, одна статья в журнале, включенном в российскую библиографическую базу данных РИНЦ, четыре свидетельства о государственной регистрации баз данных, а также шесть статей и тезисов в сборниках трудов конференций. В том числе:

1. **Е.С. Исаева**, С.А. Язев Комплексы активности в 24 цикле: Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621721 Российская Федерация, дата регистрации 11 декабря 2014 г.
2. **Е.С. Исаева**, В.В. Капленко, В.И. Красов, С.И. Расчетин, С.А. Язев «База данных «Данные о солнечных пятнах по наблюдениям астрономической обсерватории ИГУ»», Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2012620247, 28 февраля 2012 г.
3. **Е.С.Исаева**, С.А.Язев «Рентгеновские вспышки и комплексы активности на Солнце в фазе роста 24-го цикла», Солнечно-земная физика. Вып. 22 (2013) с. 3–11.
4. **Е.С.Исаева**, В.В.Капленко, С.И.Расчетин, С.А.Язев Наблюдения солнечных пятен в Астрономической обсерватории ИГУ . /Избранные проблемы астрономии: Мат-лы IV Всероссийской астроном. конф. «Небо и Земля» под ред. С.А.Язева. – Иркутск, изд-во «Оттиск», 2016., С. 158-165.
5. **Е.С.Исаева**, С.А.Язев База данных «Протонные вспышки в комплексах активности», Свидетельство гос. регистрации № 2017620340 от 24 марта 2017 .
6. **Е.С.Исаева**, В.М.Томозов, С.А.Язев «О пространственно-временном расположении протонных вспышек на солнечной поверхности». Тезисы докладов, БШФФ-2017 С.18.

7. **Е. С. Исаева**, В.М.Томозов, С. А. Язев, «Протонные вспышки в комплексах активности на Солнце: причины и следствия», *Астрономический журнал*, выпуск 3, том 95, 2018, с. 256-264.
8. **Е.С.Исаева**, С.А.Язев «Рентгеновские вспышки в комплексах активности на Солнце». / Солнечно-земные связи и геодинамика Байкальско-Монгольского региона: результаты многолетних исследований и научно-образовательная политика (к 100-летию ИГУ) : тез. докл. XII Рос.-монг. междунар. конф./ РАН, Сиб. Отд-ние, Иркут. науч. центр, Ин-т земной коры, Ин-т солн-зем. физики. – Иркутск, Изд-во ИГУ, 2018, С. 17-18 .
9. **Е.С.Исаева**, В.М.Томозов, С.А. Язев Статистика солнечных вспышек в 24 цикле активности. XIII российско-монгольская международная конференция по астрономии и геофизике «Солнечно-земные связи и геодинамика Байкало-Монгольского региона» 15-19 июля 2019. Иркутск, ИСЗФ СО РАН, 2019, С. 10.
10. **Е.С.Исаева**, В.М.Томозов, С.А.Язев, «Рентгеновские вспышки и комплексы активности на Солнце в 24 цикле», *Астрономический журнал*, выпуск 1, том 97, 2020, с. 64-72.
11. В.М.Томозов, С.А.Язев, **Е.С.Исаева** «Гамма-вспышки и комплексы активности на Солнце» *Астрономический журнал*, 2020, том. 97, № 8, С. 722-730.
12. С.А.Язев, М.М.Ульянова, **Е.С.Исаева** «Комплексы активности на Солнце в 21 цикле солнечной активности». – *Солнечно-земная физика*, 2021, т. 7, № 4, С. 3-10.
13. С.А.Язев, **Е.С.Исаева**, Ю.В.Ишмухаметова Активные области на Солнце с повышенной вспышечной активностью в 24 цикле.» *Астрономический журнал*, 2021, том 98, № 6, С.506-517.
14. **Е.С.Исаева**, С.А.Язев «25-й цикл солнечной активности: первые 20 месяцев развития.» *Избранные проблемы астрономии: материалы V Всероссийской астрономической конференции «Небо и Земля», посвященной 90-летию астрономической обсерватории ИГУ. Иркутск, 23-25 ноября 2021г. / ФГБОУ ВО «ИГУ»*; под ред. С.А.Язева.– Иркутск : Издательство ИГУ, 2021.– С. 87-93.

15. S. Yazev, V. Tomozov, **E. Isaeva** "Activity Complexes on the Sun in cycle 24", Astronomy at the epoch of multimessenger studies, the VAK-2021 conference, Aug 23-28, 2021 – Moscow: Janus-K, 2022, - p. 343-344.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 114 наименований. Общий объем диссертации 135 страниц, включая 49 рисунков и 15 таблиц.

Глава 1. Методика и использованные данные наблюдений

1.1 Введение

В настоящей главе изложены данные астрономических наблюдений солнечных пятен и применявшаяся в работе методика изучения вспышечных проявлений комплексов активности (далее – КА) на Солнце, основанная на анализе данных наблюдений. Изложен метод площадок длительной активности, предложенный в Институте солнечно-земной физики СО РАН В.Г.Баниным и С.А.Язевым [8] с помощью которого осуществляется идентификация ядер комплексов активности (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 Иркутского государственного университета (ИГУ) в течение 24 цикла солнечной активности. Вся обработка наблюдений 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.

1.2 Данные наблюдений

Для исследования вспышечной активности комплексов активности (КА) была первоначально выполнена задача выделения (идентификации) КА, и их последующей систематизации. Поскольку активные области, входящие в состав КА, являются частью общей популяции АО (групп пятен) на Солнце, необходимо первоначально иметь полный набор данных о группах пятен.

Для работы были использованы данные наблюдения солнечных пятен из разных источников: данные из бюллетеней «Солнечные данные» и «Solar Geophysical Data» за 1976 – 1991 гг, данные космических обсерваторий SOHO и SDO, а также данные наблюдений солнечных пятен, выполненных на астрономической обсерватории ИГУ в Иркутске.

1.2.1 Наблюдения солнечных пятен в Иркутске

Наблюдения солнечных пятен были начаты астрономической обсерваторией ИГУ (далее – АО ИГУ) в 1940 году с использованием исторического пятидюймового телескопа-рефрактора Цейсса [29]. Первым наблюдателем по поручению директора обсерватории, будущего академика АН УССР и директора Главной (Голосеевской) астрономической обсерватории Украины Е.П.Федорова стал иркутский астроном А.А.Каверин [22]). Наблюдения осуществлялись визуально; выполнялись карандашные зарисовки солнечных пятен, по которым определялось количество пятен и рассчитывалось число Вольфа.

Начиная с 1950 года, служба Солнца была включена в обязательства пяти астрономических обсерваторий СССР. В июне 1950 г. обсерватория получила фотогелиограф ФГ-1 системы Максудова с пружинным затвором и кассетной частью (фотографирование Солнца велось на стеклянные фотопластинки форматом 9 на 12 см). На протяжении тех лет наблюдения Солнца велись параллельно на рефракторе Цейсса и фотогелиографе. Для фотогелиографа в 1950 году был построен специальный деревянный павильон с раздвигающейся

крышей на астроплощадке обсерватории [43]. Наблюдения продолжались вплоть до 1972 года.

В 1972 г. работы по солнечной тематике были прекращены, поскольку аналогичные наблюдения уже давно велись в Сибирском институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн (СибИЗМИР) АН СССР на телескопе АФР – сначала в поселке Зуй под Ангарском, затем в Байкальской астрофизической обсерватории в пос. Листвянка на берегу озера Байкал. Фотосферный телескоп АФР был также снабжен пружинным затвором и аналогичной фотогелиографу ФГ-1 кассетной частью, но качество изображения на фотопластинках было более высоким – отчасти из-за характеристик телескопа, отчасти из-за различий в астроклимате (астроплощадка обсерватории, где был установлен фотогелиограф, находилась в черте города).

Наблюдения солнечных пятен были продолжены в АО ИГУ спустя более чем три десятилетия. Наблюдения были начаты на телескопе Цейсса, выполненном по оптической схеме кудэ. Рефрактор снабжен полуапохроматическим объективом AS с апертурой 150 мм и фокусным расстоянием 2250 мм; относительное отверстие – 1:15. Для наблюдений Солнца используется апертурный фильтр на базе плоскопараллельной стеклянной пластины с алюминиевым напылением.

Телескоп перевезен из Тункинской радиоастрономической обсерватории ИСЗФ СО РАН и установлен на астрономическом полигоне Восточно-Сибирского филиала ФГУП «ВНИИФТРИ» вблизи Иркутского водохранилища за чертой города (широта – $52^{\circ}17'$ с.ш., долгота – $104^{\circ}20'$ в.д., высота над уровнем моря 460 м) в деревянном павильоне с плоской раздвигающейся крышей, предоставленном астрономической обсерватории ИГУ. Здесь он работал в 2006 -2019 гг. В 2006-2007 гг велись работы по созданию на основе этого телескопа цифрового астрономического комплекса и отработке методики наблюдений [1;43;76;23]. В 2007 г. комплекс был введен в строй (рис.1.1). Съемки диска Солнца с помощью современных цифровых камер позволили возобновить регулярные наблюдения солнечных пятен.

После распада СССР прекратила свое существование и национальная служба Солнца. Регулярные наблюдения солнечных пятен, определение их количества, гелиографических координат и площадей в России осуществляют, насколько известно авторам, только три обсерватории: Кисловодская станция ГАО РАН, Уссурийская астрофизическая обсерватория ДВО РАН (оснащенная телескопом, аналогичным иркутскому), а также с 2007 года астрономическая обсерватория ИГУ. В начале нулевых годов телескоп АФР Байкальской астрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН был демонтирован, регулярные наблюдения фотосферы прекращены.



Рис.1.1 Телескоп астрономической обсерватории ИГУ на полигоне в
ВНИИФТРИ, 2012 г

В 2020 г.телескоп был перенесен на новую площадку в ботаническом саду ИГУ. Таким образом, в течение полного 24 цикла (2009 – 2019 гг) солнечной активности на телескопе регулярно проводились наблюдения солнечных пятен, начиная с 2013 г с активным участием автора.

Методика наблюдений сводилась к следующему. В течение светового дня, при хороших погодных условиях (температура окружающей среды выше -15 градусов Цельсия) выполнялась серия снимков фотосферы Солнца. Цифровые изображения переносились с цифровой фотокамеры на компьютер, после чего автором выполнялась предварительная обработка изображений.

Дальнейшая обработка полученных снимков первоначально осуществлялась с помощью специального пакета программ, разработанного Д.В.Ерофеевым в Уссурийской астрофизической обсерватории Дальневосточного Отделения РАН и переданного для использования астрономической обсерваторией ИГУ [76;23]. В 2012 году обработка снимков начала осуществляться по программе SolarView, предоставленной женой А.Г.Тлатовым, рис.1.2.

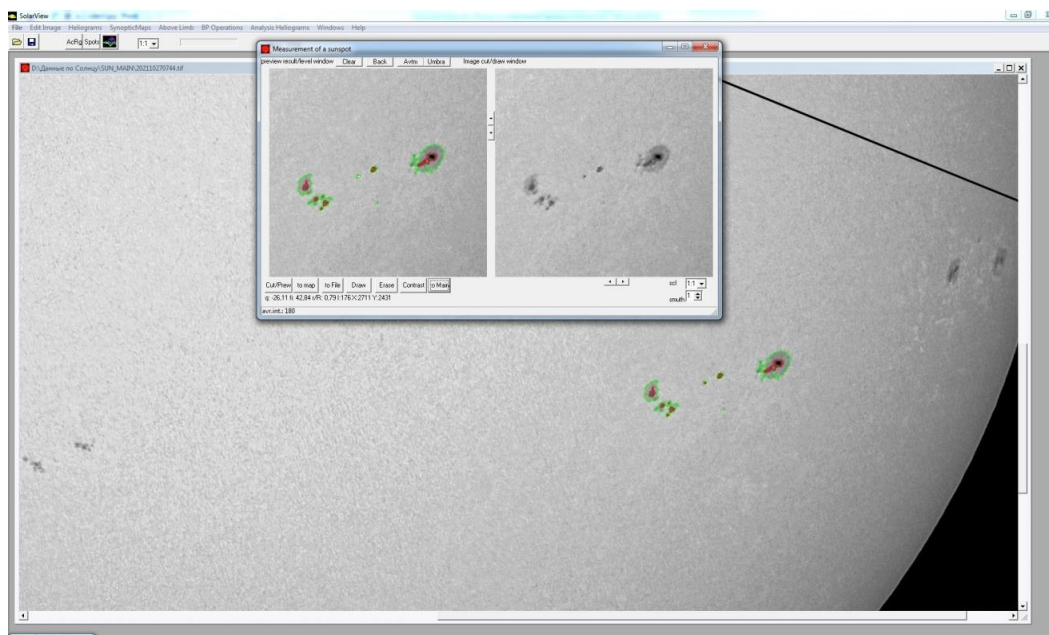


Рис. 1.2 Часть интерфейса программы SolarV, в которой происходит обработка снимков Солнца

В соответствии с принятой методикой, с помощью программы SolarV определялись кэррингтоновские гелиографические координаты центров групп солнечных пятен, площади пятен, выраженные в миллионных долях полусферы и исправленные за эффект перспективного сокращения. Подсчитывалось

количество отдельных пятен, наблюдаемых на диске. Соответствующие числа заносились в специальные файлы формата .grp, рис. 1.3, на основе которых программа вычисляла ежедневное значение числа Вольфа

$$W = 10 g + f$$

где g – число групп солнечных пятен, наблюдаемое одновременно на солнечном диске, f – общее количество отдельных пятен, включая отдельные ядра в пределах общей полутени крупных пятен.

202110270744.grp — Блокнот

Файл Правка Формат Вид Справка

D:\данные по Солнцу\SUN_MAIN\2021_grp\10_grp\202110270744.grp 2021/10/27 07:44 parameters: -10,0 15 0,30 observer: e

R: 1646 хс: 1680 ус: 1685 D: 4.8 L0: 288.2 P: 0.0 (25.1)

N | g | fi | L | r/R | Smlm | SpX | dq | dfi | Int | cntr | Perim | Ind

Ngr: 2886 Nsp= 1 fi= 44.3 : 44.3 (332.5 : 332.5) q=-19.4 : -19.4 umb: 1 wg: 11

pxl=1593 s=145.0 smx=145.0 r=0.76 : 0.76 (0.76) qs=-19.3 fis=44.2

1	-19.36	44.28	332.48	0.764	145.0	1593.0	2.0	2.1	140.6	0.14	1.084	1
um 1	-19.37	44.23	332.43	0.763	25.8	284.0	0.7	1.0	65.7	0.60	0.406	1
Ngr: 2887	Nsp= 27	fi= -17.7 : -10.4	(270.5 : 277.8)	q=-30.0 : -23.0	umb: 20	wg: 42						
pxl=6909	s=489.0	smx=194.4	r=0.50 : 0.61	(0.56)	qs=-26.0	fis=-14.3						
1	-24.19	-10.43	277.77	0.511	189.9	2778.0	2.2	2.8	150.2	0.08	1.213	1
um 1	-23.22	-11.60	276.60	0.503	0.7	11.0	0.1	0.1	131.3	0.20	0.039	1
um 2	-24.15	-10.33	277.87	0.510	38.8	568.0	1.1	1.3	90.5	0.45	0.504	1
2	-28.67	-16.29	271.91	0.601	194.4	2643.0	3.3	2.7	156.9	0.04	1.940	2
um 1	-28.01	-16.07	272.13	0.592	14.4	197.0	0.7	0.7	130.6	0.20	0.308	2
um 2	-28.27	-16.80	271.40	0.599	1.0	13.0	0.2	0.1	137.1	0.16	0.050	2
um 3	-29.49	-16.30	271.90	0.611	22.3	300.0	0.6	1.6	124.6	0.24	0.477	2
3	-26.15	-15.04	273.16	0.562	20.7	291.0	0.7	0.9	155.1	0.06	0.316	3
um 1	-26.20	-15.00	273.20	0.563	9.5	133.0	0.4	0.7	136.4	0.17	0.219	3
4	-22.97	-12.21	275.99	0.503	12.2	179.0	0.6	0.7	176.7	0.08	0.343	4
um 1	-22.96	-12.41	275.79	0.504	1.7	25.0	0.3	0.2	167.8	0.02	0.090	4
5	-23.05	-14.55	273.65	0.519	10.7	155.0	0.7	0.4	174.5	0.06	0.244	5
um 1	-22.95	-14.59	273.61	0.518	1.4	20.0	0.3	0.2	167.7	0.02	0.075	5
um 2	-23.34	-14.47	273.73	0.522	0.5	7.0	0.1	0.1	168.7	0.03	0.027	5
6	-26.71	-13.34	274.86	0.560	7.7	109.0	0.5	0.5	171.1	0.04	0.186	6
um 1	-26.78	-13.41	274.79	0.561	0.9	13.0	0.1	0.2	158.8	0.03	0.046	6
7	-24.76	-14.96	273.24	0.544	7.6	108.0	0.4	0.6	171.4	0.04	0.183	7
um 1	-24.77	-15.07	273.13	0.545	1.0	14.0	0.2	0.1	158.2	0.04	0.051	7
8	-28.95	-14.07	274.13	0.593	7.3	100.0	0.4	0.5	166.4	0.01	0.157	8
um 1	-28.95	-14.07	274.13	0.593	2.8	39.0	0.2	0.3	157.7	0.04	0.116	8
9	-27.51	-11.55	276.65	0.562	6.8	96.0	0.5	0.5	163.8	0.00	0.169	9
um 1	-27.49	-11.56	276.64	0.562	3.3	47.0	0.3	0.3	153.6	0.06	0.113	9
10	-25.73	-12.98	275.22	0.538	4.5	64.0	0.4	0.4	176.0	0.07	0.154	10

Рис. 1.3 Фрагмент таблицы формата grp, полученной с помощью программы

А.Г.Глатова

Помимо вышеописанных параметров, с помощью указанной программы определялись отдельно площадь наибольшего пятна в данной группе пятен и его гелиографические координаты. Кроме этого, наблюдатель определял класс группы пятен в соответствии с цюрихской классификацией (см., например, [33]).

На основе предварительного анализа ежедневных данных формировался каталог (сводка) с результатами наблюдений, в которой содержались следующие элементы: год; месяц; календарная дата; всемирное время UT; время, выраженное в долях суток; количество отснятых кадров (не менее 12 на каждую дату); номер группы пятен, согласно номенклатуре NOAA США; число пятен в данной группе, включая отдельные ядра внутри полутени большого пятна и отдельные ядра вне полутени (поры); суммарная площадь всех пятен, входящих в данную группу, выраженная с миллионных долей полусферы; площадь самого

крупного пятна в данной группе; гелиографические координаты самого крупного пятна; гелиографические координаты геометрического центра группы пятен - безразмерный параметр, описывающий удаление главного пятна от центра солнечного диска (отношение расстояния центра пятна от центра диска r к радиусу видимого диска Солнца R); класс группы по цюрихской классификации. А также рассчитанное число Вольфа на искомую дату – отдельно для полного диска Солнца и для центральной зоны с радиусом $0,6 R$. Кроме того в таблице указаны наблюдатели и качество изображения по пятибалльной шкале по субъективной оценке наблюдателя во время наблюдения, и качество полученных цифровых снимков, также оцененное по пятибалльной шкале.

Согласно штатной программе обработки данных наблюдений, выполнялась ориентация снимков на основе методики разработанной в автором. В результате изображения Солнца были сориентированы в соответствии с международными стандартами представления изображений Солнца (север – сверху, восток – слева). Примеры приведены на рис. 1.4 и 1.5.



Рис. 1.4 Пример цифрового снимка, полученного в обсерватории ИГУ, 7 июля

2014



Рис. 1.5 Пример цифрового снимка, полученного в обсерватории ИГУ, 6 января 2014

Полученные и рассчитанные данные заносились в таблицу в формате excel, которая представляет собой сводный каталог данных о солнечных пятнах, описанный выше (рис.1.6).

	год	месяц	день	время UT	время UT (доля суток)	количество кадров	№ группы	Число пятен	Площадь главного пятна	Площадь главного пятна	Координаты пятна		Координаты геометрического центра		r/R главного пятна	Класс	Число Вольфа		Наблюдатель	Кач-во набл	Кач-во снимка	Примечание
											F	L	F	L			общее	ц.зоны				
7871	2017	12	12	4:22:42	0,183	8	2691	3	12,6	5,8	-3,21	218,51	-3,5	220,1	0,48	B	14	14	Pa	3	2	на юго-востоке
7872	2017	12	13	4:03:36	0,169	5													Kp	3		
7873	2017	12	14	4:04:38	0,17	5													Kp	4		
7874	2017	12	20	5:03:44	0,211	8	2692	2	8,7	6,5	18,48	86,49	17,5	86,4	0,84	B	12	0	Pa	4	3	на северо-востоке
7875	2017	12	21	4:55:05	0,205	8	2692	9	119,1	42,5	18,54	84,09	17,4	86,8	0,74	C	22	0	Pa	4	3	на северо-востоке
7876	2017	12	22	4:23:10	0,183	5	2692	9	169,4	49,3	16,6	91,3	14,4	87,4	0,5	D	24	0	Kp	3	4	на северо-востоке
7877	2018	1	3	5:06:16	0,213	3													Kp	4		
7878	2018	1	4	4:29:47	0,187	8	2693	2	24,6	12,8	19,53	331,30	18,7	332,0	0,58	B	13	0	Pa	4	3	на северо-западе
7879	2018	1	6	5:26:38	0,227	8	2693	1	7,6	7,6	20,78	329,31	20,8	329,3	0,84	A	11	0	Pa	5	3	на северо-западе
7880	2018	1	9	7:02:38	0,294	5	2694	2	10,5	8,8	-31,6	244,51	-32,2	242,7	0,48	B	12	12	Kp	4	5	на юго-западе
7881	2018	1	10	5:02:08	0,21	8	2694	1	8,5	8,5	-31,3	244,08	-31,3	244,0	0,54	A	24	0	Pa	5	3	на юго-западе
7882	2018	1	10	5:02:08	0,21	8	2695	2	7,4	5,4	-7,6	258,02	-7,7	259,2	0,55	B	24	0	Pa	5	3	на юго-западе
7883	2018	1	11	5:49:25	0,243	5	2694	1	3,8	3,8	-30,9	244,54	-31	244,6	0,66	A	24	0	Kp	4	4	на юго-западе
7884	2018	1	11	5:49:25	0,243	5	2695	2	11	6,9	-6,84	260,10	-7,2	259,5	0,75	B	24	0	Kp	4	4	на юго-западе
7885	2018	1	13	5:06:23	0,213	5													Kp	4		
7886	2018	1	16	3:59:21	0,166	5	2696	3	26,1	16,1	-13,5	123,23	-13	123,0	0,41	C	14	14	Kp	4	3	на юго-востоке
7887	2018	1	17	4:56:16	0,206	8	2696	2	48,6	24,4	-13,4	124,34	-12,6	123,5	0,21	C	16	16	Pa	4	3	на юго-востоке
7888	2018	1	19	5:04:46	0,212	8													Pa	4		
7889	2018	1	28	5:30:14	0,229	8													Pa	5		

Рис. 1.6 Фрагмент каталога солнечных пятен Астрономической обсерватории ИГУ

Начиная с сентября 2013 года, автор стала штатным сотрудником астрономической обсерватории ИГУ и подключилась к наблюдениям солнечных пятен на телескопе. С этого времени автором лично ведется обработка всех снимков, полученных наблюдателями.

Качество получаемых на телескопе изображений оказалось достаточно высоким (рис.1.4, 1.5, 1.7). Сопоставление данных о площадях солнечных пятен, полученных в 2009-2011 гг на однотипных телескопах в Иркутске и Уссурийске, продемонстрировали высокую корреляцию (0.95 для среднемесячных данных) [24].

Анализ показал, что иркутские данные представляют собой достаточно однородный ряд. Оценки качества изображений, отбираемых для дальнейшей обработки по четырехбалльной шкале (2,3,4,5) показывают, что среднее качество стабильно и немного превышает оценку 4. Доля плохих изображений невелика.

Так, например, с 1 января 2009 г. по 30 сентября 2016 г. выполнены наблюдения фотосферы Солнца в течение 1707 дней из 2830 возможных (60,32 %). [43]. Лакуны в наблюдениях связаны с погодными условиями, техническими проблемами (профилактические и ремонтные работы), а также вынужденным недостатком количества наблюдателей. Статистика наблюдений по годам наблюдений в течение текущего 24 цикла солнечной активности приведена на рис.1.7.

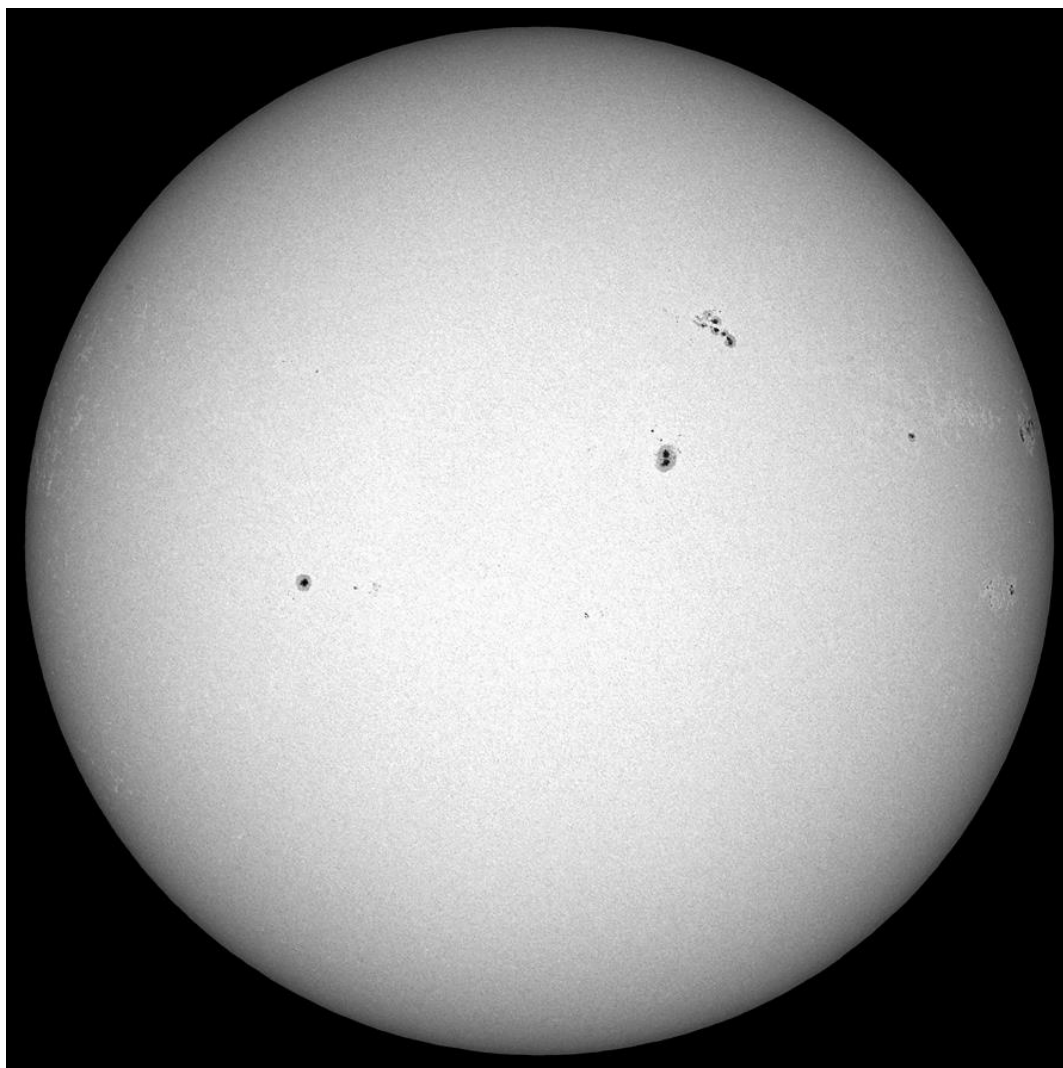


Рис.1.7. Фотогелиограмма, полученная 21 апреля 2015 г. на солнечном телескопе астрономической обсерватории ИГУ



Рис. 1.8. Статистика наблюдений Солнца за период январь 2009 г – сентябрь 2016 г. в астрономической обсерватории ИГУ

Первый год штатных наблюдений (2009) продемонстрировал потенциальные возможности пункта наблюдений с точки зрения астроклимата, – в этом году количество дней наблюдений фактически определялось только погодными условиями.

На рис.1.9 показан ход среднемесячного индекса «число Вольфа», тонкая линия – по данным международной службы World Data Center SILSO (Центра сбора и обработки солнечных индексов в Брюсселе), жирная линия – по данным астрономической обсерватории ИГУ. Поскольку методика подсчета индекса «число Вольфа» в 2015 г. изменилась по решению центра SILSO [10], значения международной службы, начиная с июля 2015 года, делились на коэффициент 0.6, чтобы сохранить единую систему. Коэффициент перехода между системами SILSO и АО ИГУ составил в среднем $0,6 \pm 0,2$ (заметим, что именно такой коэффициент введен центром SILSO для перехода к новой системе в 2015 г.). Средняя разность между данными АО ИГУ и SILSO по данным 24 цикла составила $21,7 \pm 9,0$. Следует отметить, что анализ выборочных случаев расхождений показывает, что система АО ИГУ более объективна: при подсчетах чисел Вольфа одной обсерваторией индекс не может быть завышен, в то время как при усреднении индекса по многим обсерваториям с разными погодными условиями и разными инструментами, как это делается в центре SILSO, индекс может быть только занижен. То обстоятельство, что значения индекса на рис. 1.9

по данным АО ИГУ оказываются систематически выше, чем по данным SILSO, свидетельствует о том, что международные данные систематически занижались по сравнению с истинным положением вещей. По-видимому, реформа 2015 г, о которой сказано выше, связана, в том числе, с попыткой исправить эту методическую погрешность, – когда учет данных многих одновременных различающихся по качеству наблюдений разных обсерваторий ухудшал (занижал) суммарный показатель по сравнению с данными индивидуальных телескопов.

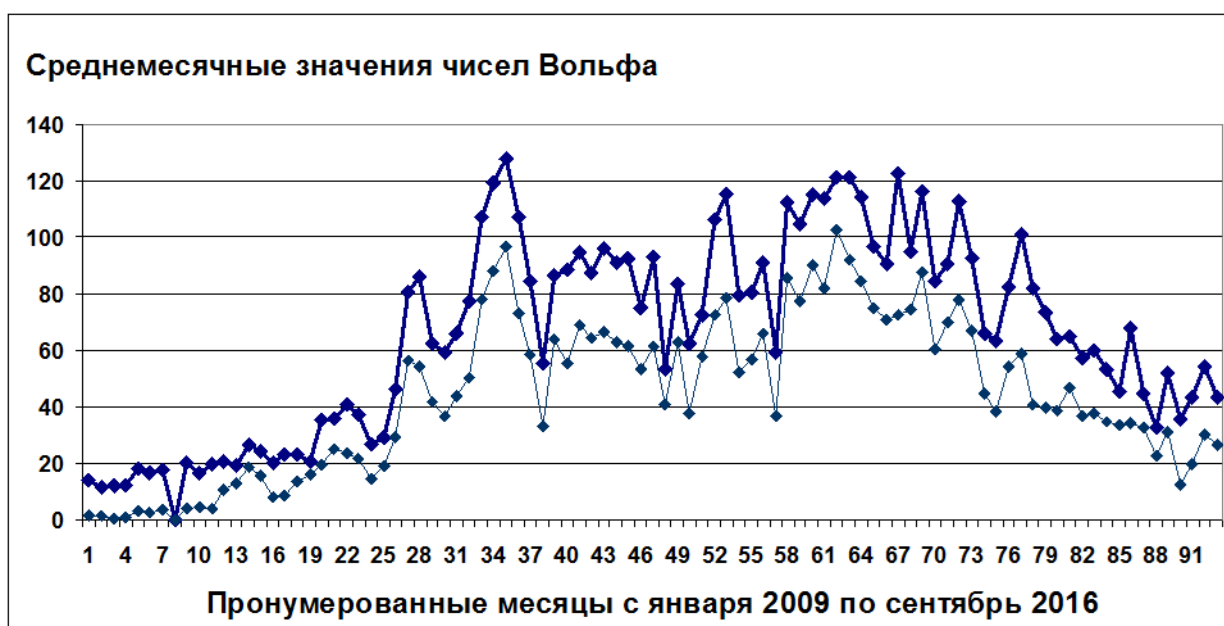


Рис.1.9. Среднемесячные значения числа Вольфа. Тонкая линия – по данным World Data Center SILSO, жирная линия – по данным астрономической обсерватории ИГУ

1.2.2 База данных солнечных пятен в 24 цикле

Начиная с 2011 г. автором была проведена работа по созданию непрерывно пополняемой базы данных (БД) на основе описанного выше каталога результатов наблюдений солнечных пятен, рис.1.10.

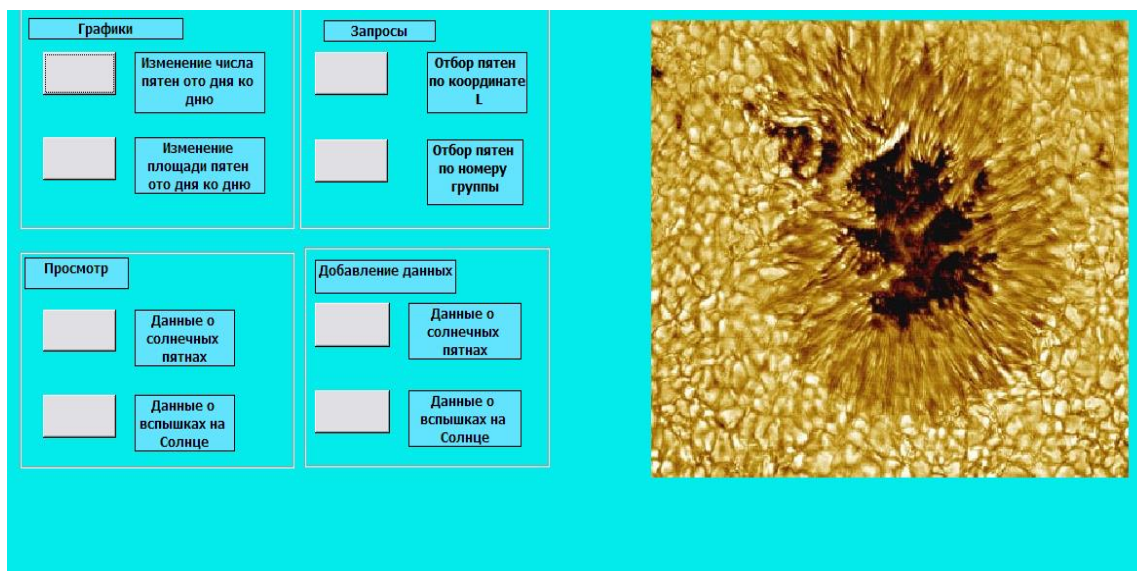


Рис.1.10 Фрагмент титульной страницы базы данных

Для более удобного поиска всей содержащейся в БД информации о конкретной группе пятен автором был создан запрос «Отбор пятен по номеру группы». Интерфейс БД позволяет выбрать данный запрос и ввести номер группы пятен, после чего пользователю представляется фрагмент каталога, содержащий всю информацию о данной группе пятен.

Кроме того, в БД предусмотрен запрос «Отбор пятен по координате L». При выборе нужного интервала значений гелиографической долготы L база выдает список групп пятен, находившихся в этом интервале.

Предусмотрена возможность строить графики изменения количества пятен и площади пятен (рис 1.11) данной группы пятен с течением времени.. Эта опция позволяет наглядно представить эволюцию данной группы пятен ото дня ко дню, описанную в индексах «число пятен в группе» и «суммарная площадь группы». В БД легко могут быть внесены новые опции, позволяющие анализировать данные, занесенные в базовый каталог. Работа по пополнению БД непрерывно пополняется автором.

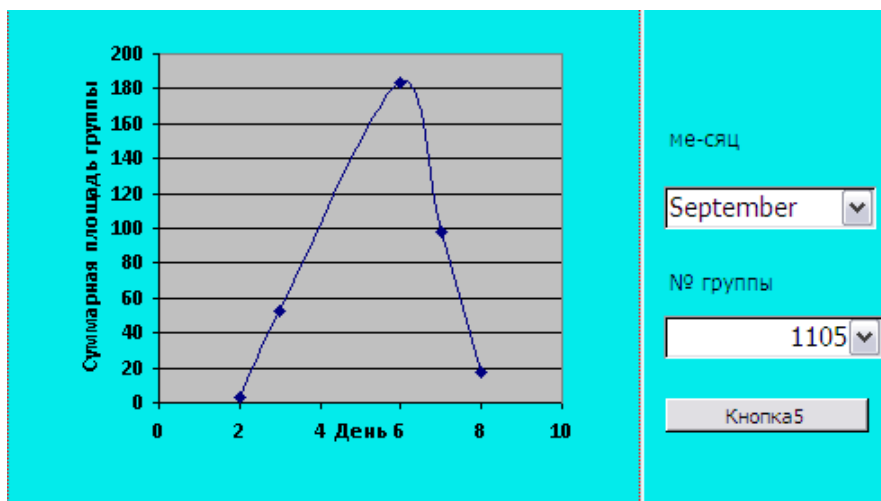


Рис. 1.11 Фрагмент интерфейса баз данных с выводом в окне графика

Также в БД добавлены данные из авторского каталога вспышек, обеспечена привязка каждой вспышки к конкретной активной области, в которой она произошла. Одна из опций включает в себя возможность просматривать связь пятенной активности со вспышками.

1.3 Комплексы активности на Солнце и методика их идентификации

Для изучения феномена вспышек происходящих в КА, первоочередной задачей является опознание (идентификация) КА. Для этого из числа общей популяции групп солнечных пятен необходимо выбрать те, которые имеют отношение к КА.

1.3.1 Идентификация комплексов активности

Комплексы активности (КА) на Солнце традиционно привлекают к себе значительный интерес как геоэффективные структуры, генерирующие наиболее мощные вспышки, включая протонные события. Понятие КА менялось со временем – от описания крупномасштабных магнитных структур [63],

выполненного Бумбой и Говардом в 1965 (эти авторы и предложили термин КА) до сложных систем из многочисленных активных областей (АО), расположенных вдоль солнечной параллели и опоясывающих весь солнечный шар [68]. Распространено отношение к терминам КА и КАО (комплекс активных областей) как к синонимам [36].

Несколько другой подход предложили Банин и Язев [4;5] . В качестве ключевого параметра КА была выбрана длительность существования АО на одном и том же участке солнечной поверхности, выделенном в кэррингтоновской системе координат – не менее двух оборотов подряд. Это значит, что пятна должны наблюдаться как минимум трижды в течение трех последовательных оборотов. Поскольку продолжительность существования одной группы пятен в подавляющем большинстве случаев оказывается кратно меньше [10;11], присутствие пятен на одном и том же месте в течение нескольких оборотов подряд означает, что здесь одна за другой всплывают из-под фотосферы новые порции магнитного потока в форме новых АО. Такие участки, где наблюдается длительное пятнообразование, с эмпирически определенным размером 20 на 20 гелиографических градусов, первоначально получили название «площадки длительной активности» (ПДА) [4], позднее для них был предложен другой термин – ядра КА [44,42]. В рамках этого подхода используется также понятие «ветви КА». Ветвь КА – это АО, в данном кэррингтоновском обороте находящаяся поблизости (на расстоянии не более 30 гелиографических градусов) от ядра КА, связанная с АО, расположенной в ядре КА, высокими корональными петлями. Ветвь (отдельная АО) существует сравнительно недолго по сравнению с ядром КА, где АО могут сменять одна другую. Ветвь КА подчиняется дифференциальному вращению (в отличие от ядра КА), постепенно смещаясь по долготе в кэррингтоновской системе координат. АО, одновременно находящиеся в ядре КА и в ветви КА образуют в данном обороте комплекс активных областей (КАО). Таким образом, КАО в рамках излагаемого подхода – это единовременный «срез» КА, описание состояния КА в данный момент времени, без учета длительной эволюции КА. В

следующем обороте данной ветви уже не будет, но ядро КА может продолжать существовать в форме новой АО, появившейся на том же месте. При этом общая магнитная структура КА может сохраняться, медленно эволюционируя на протяжении нескольких оборотов [42].

В основе изложенного подхода лежит гипотеза о том, что на Солнце существуют области, где регулярно всплывают на поверхность новые порции магнитного потока в виде КА. Подфотосферные источники поля, постоянно генерирующие такие порции, по-видимому, находятся в глубине конвективной зоны и вращаются с кэррингтоновской скоростью, что проявляется в присутствии на одних и тех же кэррингтоновских координатах пятен на протяжении длительного времени. Продолжительность периода существования пятен на одном и том же месте составляет в отдельных случаях 10-15 кэррингтоновских оборотов, что на порядок превышает среднестатистическую продолжительность существования АО [17]. Это означает, что ядро КА действительно является областью постоянного пятнообразования, где последовательно возникают несколько АО. На этом наблюдательном факте основана методика отождествления ядер КА.

Эта методика сталкивается с рядом трудностей. На фазе максимума цикла солнечной активности, когда одновременно формируется множество АО, сложно выделить ядра КА. Пояс возмущенной структуры тянется вдоль всей гелиографической параллели, и тогда можно рассматривать весь пояс как специфическое образование – один сверхгигантский КА [68]. Тем не менее, в 24 цикле такие структуры ни разу не наблюдались [45], и КА идентифицировались уверенно.

Еще одна проблема связана со следующим обстоятельством. В состав ядер КА, как правило, входят сравнительно крупные АО – группы пятен с высокой площадью, которые, как правило, сами отличаются повышенной продолжительностью существования. Поэтому есть вероятность, что долгоживущая АО может быть принята за ядро КА.

Для решения данной проблемы принято следующее решение. В подавляющем большинстве случаев продолжительность существования индивидуальной АО составляет несколько суток, в отдельных (редких) случаях – несколько недель, и крайне редко – более месяца. Введенное формальное ограничение для отождествления ядра КА – пятна должны наблюдаться в одном и том же месте в пределах выделенной площадки 20×20 гелиографических градусов не менее трех раз подряд в соседних кэррингтоновских оборотах, т.е. минимальная продолжительность наблюдения пятенной активности составляет 2 кэррингтоновских оборота.

Поскольку более 99% всех групп пятен существуют меньше трех солнечных оборотов [11], долгоживущая структура с зоной постоянного пятнообразования гарантированно включает в себя несколько АО, а не одну.

Это означает, что введенное ограничение (наблюдения пятенной активности в одном и том же месте в течение двух оборотов подряд) позволяет утверждать, что мы сталкиваемся лишь с единичными случаями экстремально долгоживущих индивидуальных групп пятен, которые не сказываются на статистике: в подавляющем большинстве случаев мы имеем дело с феноменом ядра КА.

В работах многих авторов комплексом активности называют долгоживущую группу пятен большой площади комплексом активности, допуская в результате смешение понятий. Отметим, что популяция крупных групп пятен всегда привлекала особый интерес исследователей, и множество (многие сотни) работ посвящены их статистике, эволюции и морфологии. Тем не менее, прямое применение этих результатов к КА было бы некорректным, поскольку это неидентичные объекты. Хотя крупные группы пятен с высокой продолжительностью жизни чаще всего входят в состав КА, это только один из элементов КА, в состав которого в рамках используемой концепции входят и предыдущие, и последующие АО, развивавшиеся на том же месте в кэррингтоновской системе координат.

Таким образом, для идентификации КА применено важное их свойство: как показали исследования [12; 7; 74; 46], ядра КА вращаются с кэррингтоновой скоростью, т.е. не смещаются со временем (или смещаются незначительно) в кэррингтоновой системе координат. Надо осознавать, что некоторая часть наблюдаемых групп пятен, например, на фазе максимума цикла, формируется на широте 16 градусов, которая вращается со скоростью, близкой к кэррингтоновской. Такие пятна не имеют отношения к КА, понимаемым в рассматриваемом смысле. Но, тем не менее, как указано выше, индивидуальные группы пятен, существующие на протяжении более двух солнечных оборотов, весьма немногочисленны, и заметного вклада в статистику КА дать не могут. Если же на одном и том же месте будут возникать новые АО, это свойство будет соответствовать определению КА.

Таким образом, можно констатировать, что кэррингтоновская скорость вращения ядер КА может служить важным фактором для их идентификации. Это свойство позволяет предложить следующую методику опознания КА.

Исследованиям КА, понимаемым в указанном смысле, посвящен цикл статей авторов, принадлежащих иркутской школе – начиная с 2016 г., с активным участием автора (например [3;6;44;42;75;17]). В этих работах описана феноменология КА на уровне фотосферы и хромосферы на примере нескольких ярко выраженных КА по наблюдениям в линии Н-альфа [3;25]. Кроме того, изучена статистика проявлений КА в период с 1980 по 2020 гг на протяжении трех с половиной циклов солнечной активности [44; 75].

Для отождествления ядер КА (выделения отдельной популяции групп пятен, которые развиваются в особых местах, где наблюдается непрерывное пятнообразование на протяжении как минимум двух кэррингтоновских оборотов подряд, т.е. как минимум на трех синоптических картах), удобно использовать синоптические карты, построенные в описанной (кэррингтоновой) системе координат. Карта представляет собой прямоугольную развертку солнечной поверхности за период одного полного синодического (относительно земного наблюдателя) оборота Солнца, на которой могут изображаться солнечные пятна,

локации вспышек, конфигурации проекций границ корональных дыр и другие элементы магнитных образований на солнечной поверхности.

Применявшийся метод представления солнечной активности с помощью синоптических карт имеет ряд недостатков. Проецирование сферической поверхности в прямоугольную систему координат, приводит к грубым искажениям. Однако для ряда задач это несущественно, учитывая то обстоятельство, что основные типы солнечной активности, включая группы пятен, расположены на низких гелиографических широтах, где искажения минимальны.

Синоптическая карта отражает усредненные, характерные для данного кэррингтоновского оборота особенности пространственного распределения активных структур на солнечной поверхности. Изменения с характерным временем меньше одного оборота невозможно отразить методом синоптических карт. Этот метод специально предназначен для выявления существенных изменений с характерным временем порядка продолжительности одного солнечного оборота, тем самым он оптимален для идентификации ядер КА.

Методика выделения ядер КА в 24 цикле солнечной активности сводилась к следующему. На основании ежедневных снимков фотосферы, выполненных на солнечном телескопе астрономической обсерватории ИГУ, были построены синоптические карты для каждого кэррингтоновского оборота, охватывающие период с января 2009 года по январь 2020 года. Кроме того, автором была составлена таблица (каталог) ежедневных наблюдений пятен в течение всего 24 солнечного цикла, включающая в себя гелиографические координаты групп пятен, площади групп пятен и самого крупного пятна группы, тип группы пятен по Цюрихской классификации, ее номер согласно номенклатуре NOAA США. Специальная авторская программа позволила выделить случаи, когда пятна оказывались на одних и тех же кэррингтоновских координатах в трех последовательных синоптических подряд. Выделенные случаи просматривались на картах глазомерно, и принималось окончательное решение об идентификации ядра КА.

Кроме того, были выделены так называемые ветви КА – группы пятен (АО), находившиеся поблизости от ядер КА (в пределах 30 гелиографических градусов от ядра КА к западу либо к востоку от него). Многочисленные проверки по снимкам космической обсерватории SDO на длине волны 17,1 нм показали, что во всех таких случаях наблюдались высокие корональные петли, соединяющие АО в ядре КА с АО, представляющей собой ветвь КА. В результате подтверждалась гипотеза о том, что АО, представляющая собой ветвь КА, физически связан с ядром КА, но сама не является ядром: после распада такой АО новые АО здесь уже не возникали.

На основе полученных данных был составлен каталог КА, наблюдавшихся в 24 цикле солнечной активности. Фрагмент каталога приведен на таблице 1.1.

Таблица 1.1 Фрагмент каталога комплексов активности в 24 цикле солнечной активности.

Номер ядра КА	№ оборота	№ АО в ядре КА	Кэррингтоновы координаты ядра КА		P	№ АО - ветви КА	Число АО в составе КА	АО / протонные вспышки	Примечания
			Долгота	Широта					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Северное полушарие									
24N01	2091	1035	250	+25	1	1034	2		
3	2092	1040			1,5		1		
	2093	1045			1,5		1		
24N02	2094	Поры	230	+15	0,5		1		
3	2095	1061			0,5		1		
	2096	1064			0,5		1		
24N03	2098	1083	340	+20	1	1082	2		
3	2099	1087			1		1		

Первый столбец таблицы – номер комплекса активности, где 24 – нумерация цикла, N – полушарие, 01 – порядковый номер КА в цикле; второй – номер Кэррингтоновского оборота в цикле; третий – номер АО, которая находится в ядре КА; четвертый и пятый столбец – координаты КА на солнечном диске; шестой – мощность; седьмой – номер АО, находящейся в

ветви КА; восьмой – общее число АО, которые находятся в КА; девятый – АО, в которых происходили протонные вспышки; десятый – примечания.

1.3.2 База данных «Комплексы активности в 24 цикле»

В 2014 году автором была создана база данных под названием «Комплексы активности в 24 цикле». В основу базы лег каталог, о котором говорилось в разделе 1.3.1. Первоначальный вариант каталога был создан С.А. Язевым. В дальнейшем автор принимала участие в ведении (обновлении) каталога, добавляя туда информацию о вспышках рентгеновских классов М и Х, наблюдавшихся в группах пятен, расположенных в ядрах и ветвях комплексов активности.

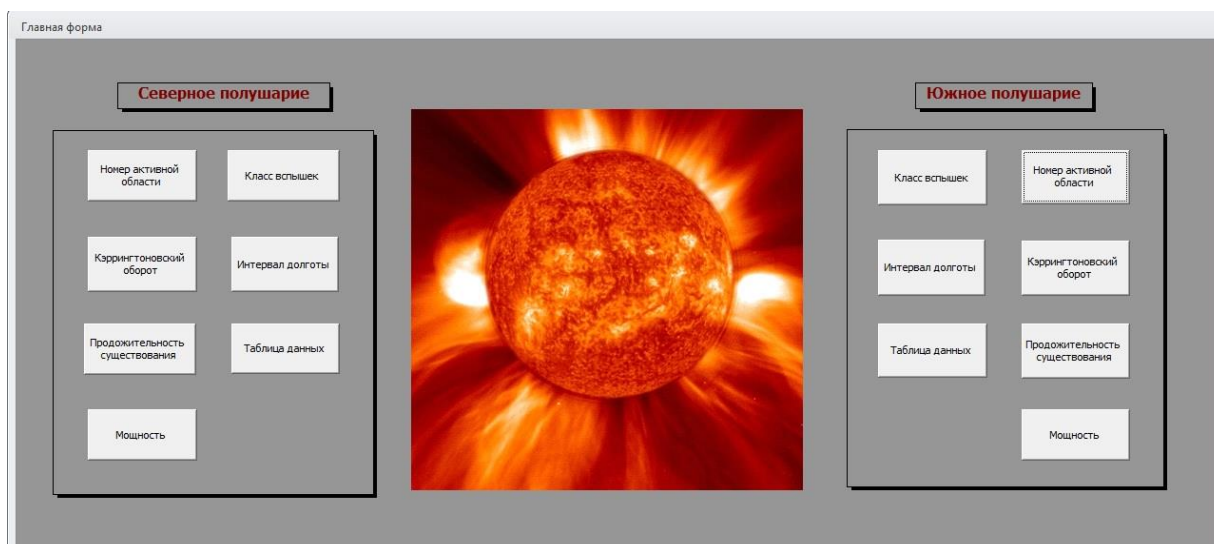


Рис. 1.12 Титульная страница базы данных «Комплексы активности»

Было введено разделение по полушариям, что позволяет облегчить анализ отдельно для северного и южного полушарий Солнца и оценивать уровень северно-южной асимметрии проявлений солнечной активности. Для просмотра каталога комплексов активности сделана кнопка «Таблица данных», нажав на которую открывается диалоговое окно, где представлена вся информация об активной области и комплексе активности, в котором она находится. Здесь мы видим Номер ядра КА, сколько оборотов он просуществовал, его

кэррингтоновские координаты, мощность. Также присутствует информация по активной области, а именно, максимальная площадь группы, максимальное число пятен в группе, число активных областей в составе КА. Данные об активных областях собраны автором по результатам наблюдений в астрономической обсерватории ИГУ.

Рис. 1.13 Фрагмент базы данных «Таблица данных»

В базе данных присутствуют различные функции поиска по заданным параметрам. К примеру, кнопка «Интервал долготы» отвечает за поиск по заданным параметрам кэррингтоновских долгот. Достаточно выбрать нужный диапазон и откроется диалоговое окно с таблицей, в которой будут собраны все активные области, которые располагались в этом интервале за 24 цикл. Шаг координат 5°.

Укажем остальные опции базы данных:

- «Номер активной области» - позволяет найти информацию об искомой АО за весь 24 цикл активности;

- «Кэррингтоновский оборот» - выводит на экран всю информацию об АО, которые находились на солнечном диске в искомом обороте;

- «Продолжительность существования» - выделяет комплексы активности с искомым периодом существования. К примеру, необходимо найти все продолжительные КА, свыше 6 оборотов, опция позволит это сделать в 1 клик;
- «Мощность» - выделяет КА с искомой мощностью, шаг параметра 0,5;
- «Класс вспышки» - данная опция используется на поиска вспышек, произошедших в КА, а также выделяет вспышки определенного класса.

1.3.3 База данных «Протонные вспышки в комплексах активности»

В 2016 году автором была создана база данных «Протонные вспышки в комплексах активности». В этой базе собраны данные за четыре цикла солнечной активности, начиная с 21 цикла. Формат этой базы данных немного отличается от предыдущих, и позволяет ознакомиться с данными более чем за 40 лет.

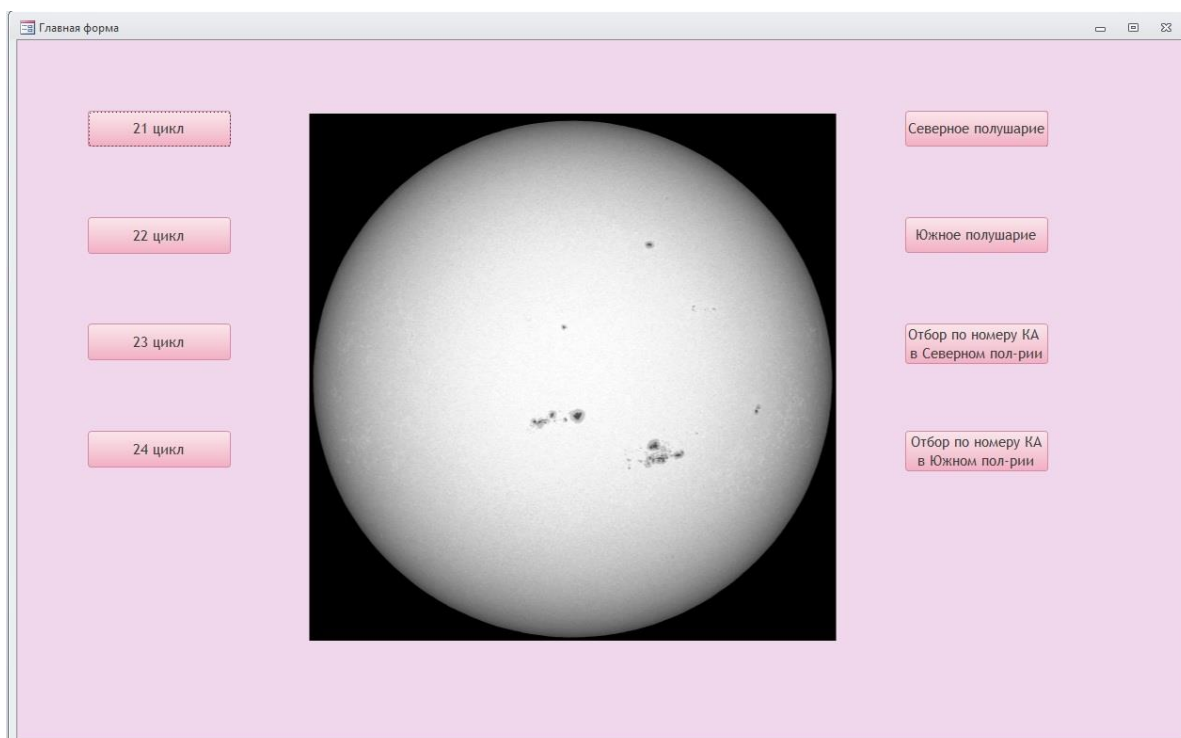


Рис. 1.14 Фрагмент титульной страницы базы

Данные за каждый отдельный цикл представлены в разных таблицах и выведены на титульную страницу. В каждой из таблиц приведена информация: Дата вспышки (год, месяц, день); время максимума вспышки; время в долях; Активная область, к которой принадлежит вспышка; Координаты расположения АО на солнечном диске; Класс вспышки; Номер кэррингтоновского оборота; L – долгота, на которой произошла вспышка; Принадлежность к КА; Номер КА (если вспышка принадлежит к КА); Количество протонов в потоке.

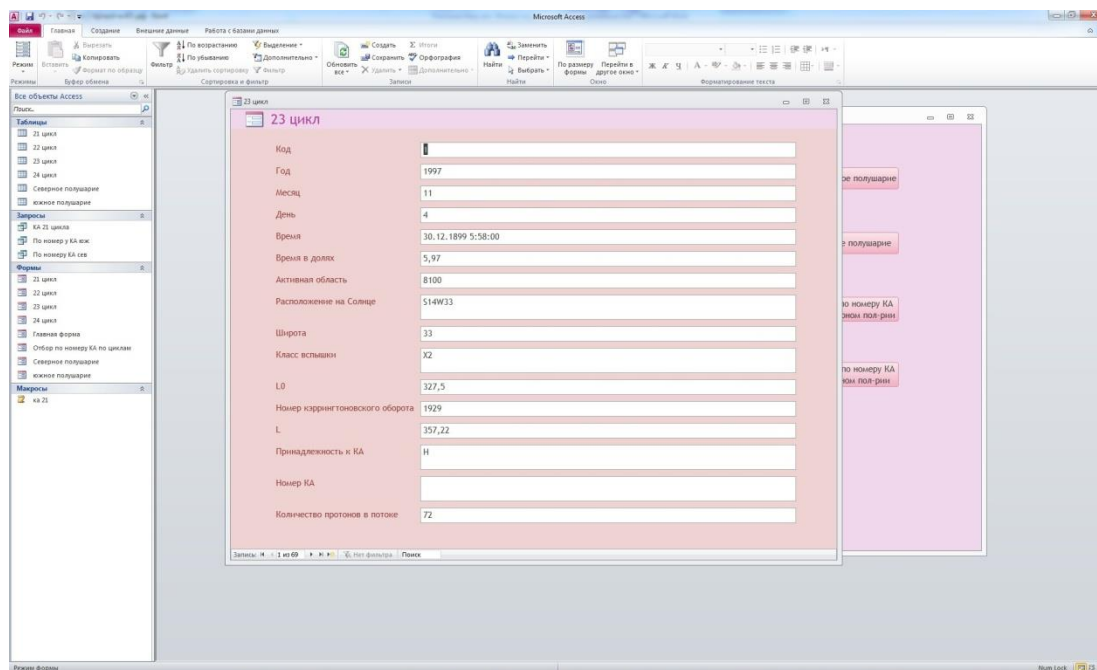


Рис. 1.15 Фрагмент базы данных, пример данных о вспышке в 23 цикле

Как и в предыдущей базе данных, здесь присутствует разделение данных по полушариям, выделенные в соответствующие опции. При выборе опции всплывает диалоговое окно, которое показывает данные о вспышках, которые произошли, к примеру, в северном полушарии, рис. 1.16.

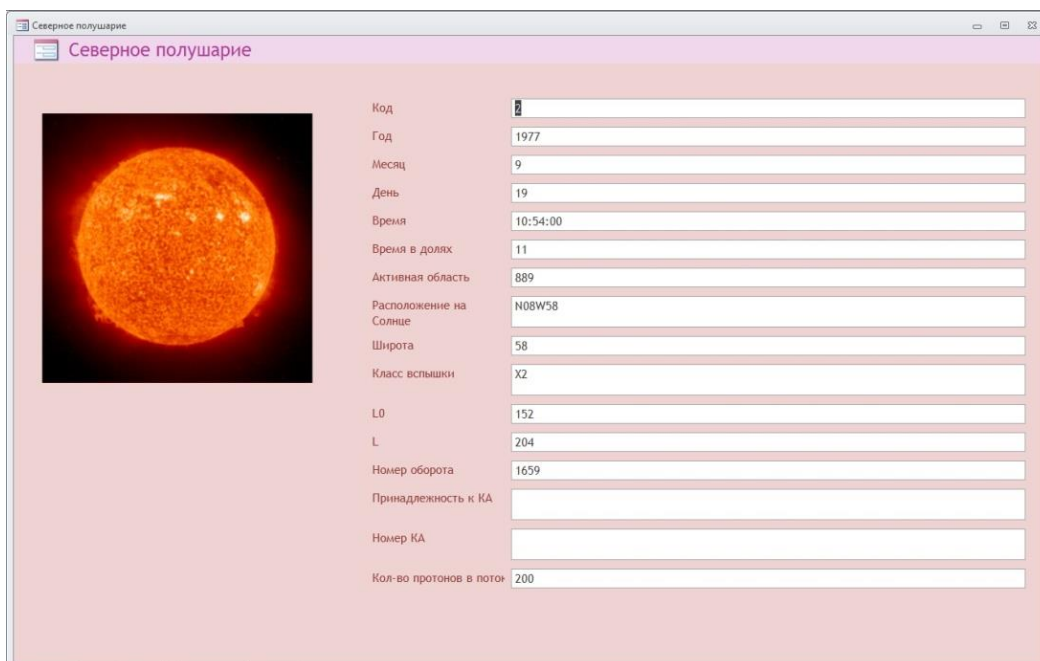


Рис. 1.16 Фрагмент базы данных, опция «Северное полушарие».

Опция «Отбор по номеру КА...» упрощает поиск данных при заданном значении комплекса активности, показывая всю информацию по протонной вспышке.

1.4 Синоптические карты

Для изучения связи крупных протонных событий с комплексами активности автором было создан каталог, в котором отражены все вспышки рентгеновских классов M и X за 24 цикл. Использовались данные спутников GOES на сайте <http://www.thesis.lebedev.ru>.

В каталог включены такие данные, как дата (год, день и месяц), когда произошла вспышка; время max – момент всемирного времени, когда был зафиксирован максимум вспышки (UT); номер активной области, в которой произошло исследуемое событие; рентгеновский класс вспышки; вспышечный индекс, о котором уже говорилось выше; вид вспышки – обычный или LDE (медленное затухание).

В главах 2 и 3 данной работы будут описаны исследования о принадлежности этих вспышек к комплексам активности и о взаимном расположении вспышек и корональных дыр. Для этого были созданы специальные синоптические карты с использованием данных с ряда сайтов, а также данных о координатах комплексов активности были из каталога, созданного С.А.Язевым. и дополненного автором.

Был создан шаблон синоптических карт, после чего для каждого кэррингтоновского оборота 24 цикла на карты были нанесены ядра комплексов активности, положения вспышек и контуры корональных дыр. Примеры карт приведены на рис.1.17, рис.1.18.

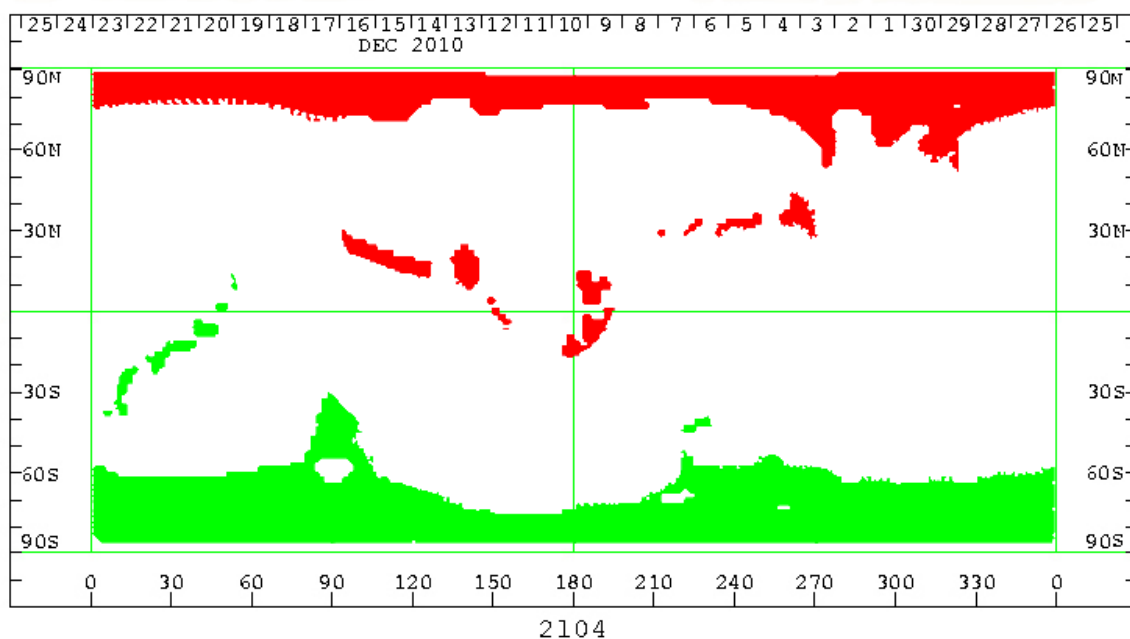


Рис.1.17 Пример синоптической карты в «спокойный» беспятенный период, декабрь 2010

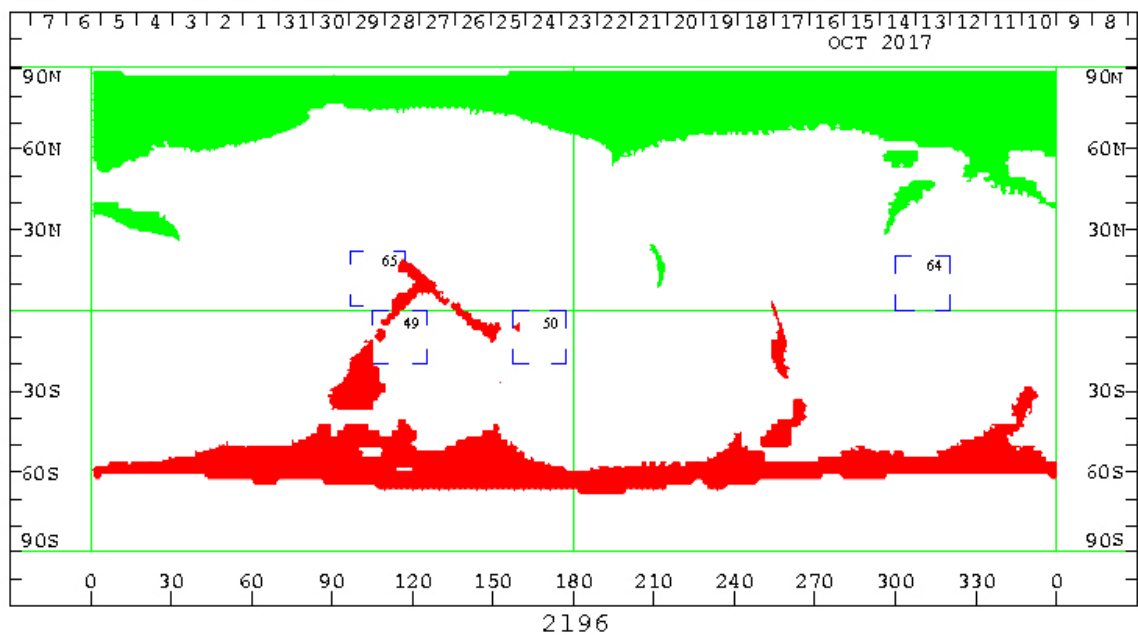


Рис 1.18. Пример карты с нанесенными КА, на которой в виде квадратов представлены ядра комплексов активности в обоих полушариях, октябрь 2017

1.5 Выводы к главе 1

В настоящей главе

– указаны данные наблюдений, использовавшиеся для исследований в рамках выполнения диссертационной работы. Для анализа развития КА в 21 цикле солнечной активности использовались данные о солнечных пятнах из бюллетеней «Солнечные данные» и «Solar Geophysical Data». Для анализа КА и их вспышечной активности в 24 цикле использовались открытые данные космических обсерваторий SOHO и SDO, а также данные собственных наблюдений солнечных пятен на телескопе астрономической обсерватории ИГУ.

– изложена применявшаяся в ходе выполнения диссертационной работы методика систематизации данных наблюдений. Были составлены каталоги солнечных пятен за 21 и 24 циклы солнечной активности, а также соответствующие базы данных. С помощью авторской программы выделены

комплексы активности в первой половине 21цикла и в 24 цикле, составлены каталог и база данных для КА в 24 цикле, включая их вспышечную активность, созданы синоптические карты. Эти материалы были использованы для исследования вспышечной активности КА; результаты приведены в следующих главах.

Глава 2. Рентгеновские вспышки и комплексы активности

2.1 Введение

В настоящей главе приведены результаты исследования связи комплексов активности с различными типами рентгеновских вспышек. В первом разделе главы описаны результаты идентификации КА в первой половине 21 цикла (1976-1980 гг). Это исследование дало возможность расширить период времени, на протяжении которого сопоставлялись КА и вспышки некоторых типов, 4 циклов (с 1976 по 2019 гг. Отдельно рассмотрены вспышки рентгеновских классов М и Х, популяция сильных протонных вспышек, воздействующих на природную среду безотносительно к их рентгеновскому классу.

2.2 КА в 21 цикле солнечной активности

В ряде работ с участием автора изучена статистика проявлений КА в период с 1980 по 2020 гг на протяжении трех с половиной циклов солнечной активности (например, [44, 75]), т.е. исследовались КА, наблюдавшиеся в интервале времени с 1980 по 2019 гг. Выбор данного интервала связан с тем обстоятельством, что в 1980 г был введен в строй хромосферный телескоп полного диска Байкальской астрофизической обсерватории Института солнечно-земной физики СО РАН (в то время СибИЗМИР СО АН СССР) [7]. Появление этого инструмента, позволяющего наблюдать полный диск Солнца с высоким разрешением в свете линии Н-альфа, давало возможность анализировать по собственным синхронным данным фотосферные и хромосферные проявления КА на Солнце, планировать и осуществлять мониторинг КА [9]. В результате анализ развития КА в 21 цикле был ограничен периодом с 1980 по 1986 гг. [47], динамика КА на фазах роста и начала максимума 21 цикла (1976-1979) осталась неизученной.

Для восполнения этого пробела была выполнена работа по изучению КА в первой половине 21 цикла. Исследованиям подверглись КА, развивавшиеся в первой половине цикла с 1976 по 1979 гг включительно. Это позволило дополнить имеющиеся данные, получить представление о развитии КА в течение всего 21 цикла, а также сравнить результаты с полученными ранее данными о КА в других (22-24) циклах.

Для идентификации КА, развивавшихся в первой половине 21 цикла, были построены синоптические карты солнечной поверхности в кэррингтоновских гелиографических координатах, начиная с 1637 по 1689 обороты (январь 1976 г. – декабрь 1979 г.). Аналогичные карты, начиная с 1690 оборота (январь 1980 г.) были построены ранее и анализировались в других работах [48; 75].

На карты были нанесены все группы пятен на стадии их максимального развития по данным бюллетеня Solar Geophysical Data за соответствующие 4 года. Использовались зарисовки групп пятен и табличные данные, включая координаты групп пятен и их нумерацию согласно номенклатуре NOAA.

Далее применялся следующий (описанный выше) алгоритм. На синоптических картах были выделены участки размером 20 на 20 градусов, в пределах которых как минимум на протяжении трех оборотов подряд наблюдалась пятенная активность. Такие участки идентифицировались как ядра КА. Был составлен каталог ядер КА за указанный период. Каталог содержит номер ядра КА (отдельная нумерация для объектов, находящихся в северном и южном полушариях Солнца), номер АО, расположенной (расположенных) в данном обороте в пределах ядра КА согласно номенклатуре NOAA, гелиографические кэррингтоновские координаты центра ядра КА, индекс мощности ядра КА P в данном обороте (индекс P приписывается каждой АО во время ее максимального развития, шкала значений индекса P описана в табл. 2.1 [42]), номер АО, образующих ветви КА в данном обороте, общее количество АО (в ядрах и ветвях) в КА в данном обороте. Фрагмент каталога приведен в таблице 2.2.

Таблица 2.1 Значения индекса мощности ядер КА Р

Баллы	Описание пятен в ядре КА	Аналог цюрихской классификации групп пятен
0.5	Одна либо две группа пор без биполярной структуры	А, В либо А + А
1	Одна группа пятен, включающая пятно с полутенью либо три группы пор	С либо А + А + А либо В + В
1,5	Группа пятен с двумя и более пятнами с полутенью, либо с одним крупным пятном, или две небольшие группы	С + (А или В) или Е или С + С или J или Н
2	Крупная группа с большим числом пятен и пор, в том числе с большими пятнами, либо две группы пятен	Е + (В или С) или G + (В или С)
2.5	Большая группа пятен (площадь более 1000 мдп), протяженность более 20°, либо две крупные группы пятен	F или Е + D
3	Экстремально крупная группа пятен (площадь более 2000 мдп.), либо крупная группа пятен с группами-сателлитами рядом с ней	F > 20°

Таблица 2.2 Фрагмент каталога КА в 21 цикле

Номер ядра КА	Номер оборота	Номер АО в ядре КА	Кэррингтоновские координаты ядра КА		Р	№ АО – ветви КА	Число АО в составе КА
			Долгота	Широта			
1	2	3	4	5	6	7	8
21N01	1648	733	155	+12	0,5		1
	1649	738			1		1
	1650	744			1		1
	1651	754			1	755 758	3

Описанный каталог позволил дополнить данные о КА в 21 цикле, изученные ранее для второй половины 21 цикла [46;48;44] а также проанализировать развитие КА в течение всего 21 цикла в сравнении с другими циклами. Результаты [49] сводятся к следующему.

Развитие КА в 21 цикле началось в 1648 обороте, когда в северном полушарии сформировался первый КА цикла. Это произошло через 6 оборотов после начала цикла (1642 оборот). Спустя три оборота после активизации КА в северном полушарии, в южном полушарии также появился первый КА. Последний КА 21 цикла в северном полушарии исчез в 1769 обороте, в южном – в 1771 обороте. Таким образом, для северного и южного полушарий Солнца продолжительность цикла, выраженная в индексах КА, оказалась практически одинаковой, с небольшим сдвигом на 2-3 оборота (южное полушарие –позднее).

Общее количество ядер КА в цикле составило 133 объекта (61 в северном, 72 – в южном полушарии. Сравнительные данные для 21-24 циклов приведены в таблице 2.3, данные по 22-24 циклам взяты в работах [44;75]. Чередование более высоких и более низких значений количества ядер КА, предположительно связано с проявлением правила Гневнышева-Оля. Малая статистика пока не дает возможности сделать более глубокие выводы.

Таблица 2.3 Ядра КА 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

Изменение количества ядер КА со временем в течение 21 цикла показано на рис. 2.1.

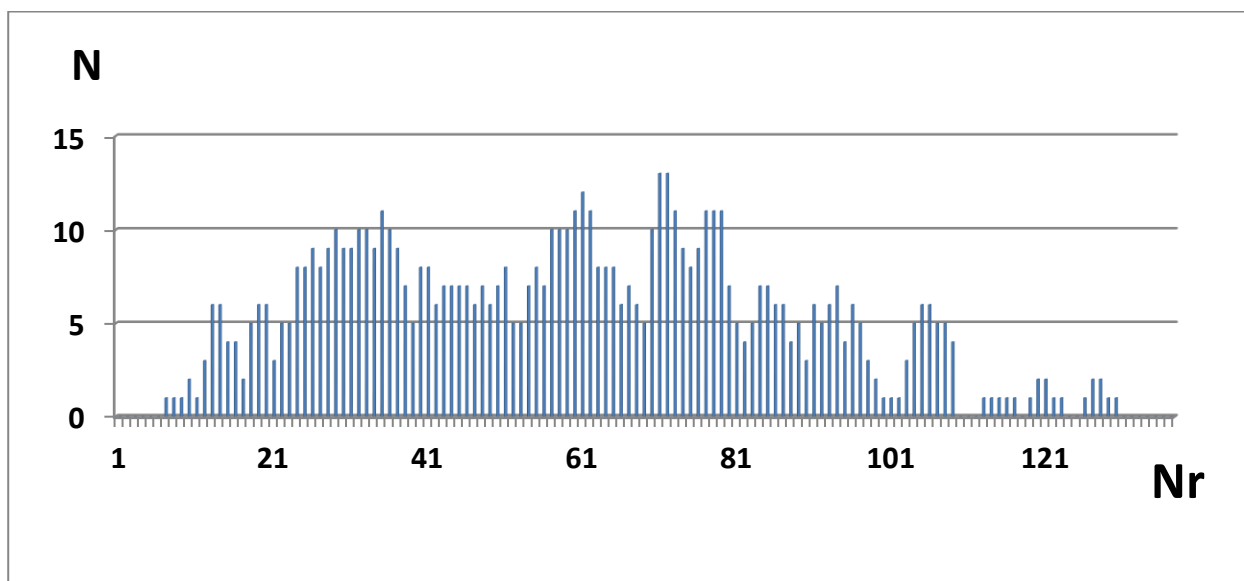


Рис. 2.1. Вариации количества ядер КА N в 21 цикле. По оси абсцисс отложены номера кэррингтоновских оборотов Nr , считая от начала цикла (1642 оборот)

Из рисунка видно, что количество КА модулировано общим ходом 11-летнего цикла, что естественно – АО, входящие в состав КА, являются частью общей популяции групп пятен на Солнце. В течение цикла наблюдаются квазипериодические вариации числа ядер КА с характерным квазипериодом около 15 кэррингтоновских оборотов, что для второй половины 21 цикла было выявлено еще в ранних работах [5;7].

На рис. 2.2 показано развитие КА отдельно для северного и южного полушария (для наглядности количеству ядер КА в южном полушарии приписаны отрицательные значения).

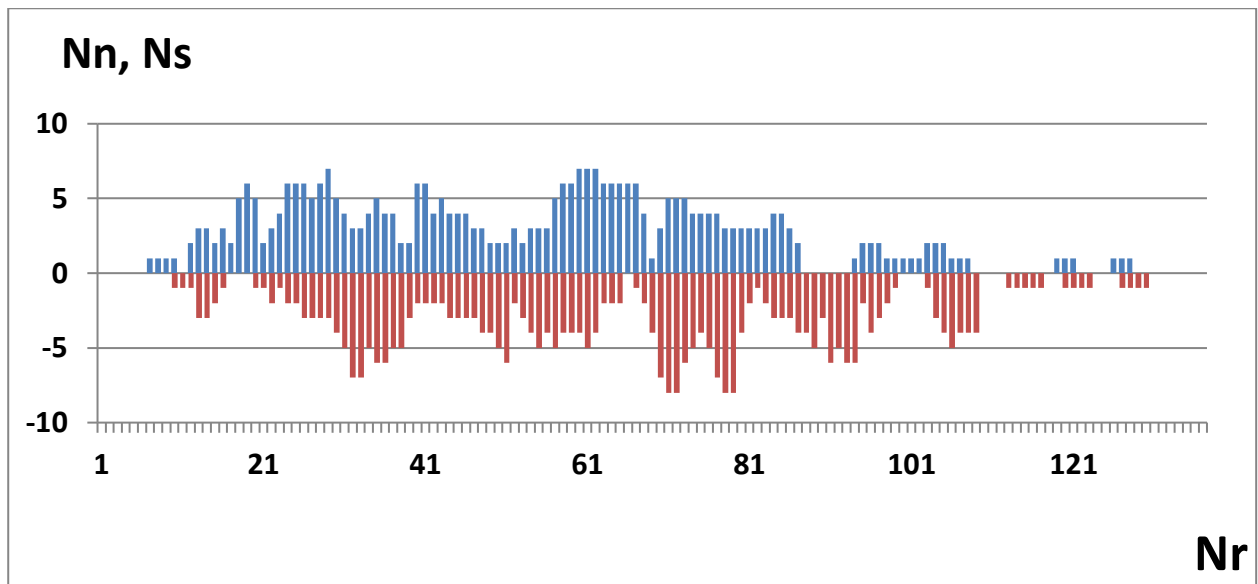


Рис. 2.2 Количество ядер КА в северном (N_n , сверху) и южном (N_s , снизу) полушариях Солнца в течение 21 цикла (N_r – номера оборотов Солнца, начиная от 1642 оборота)

Тенденция к антикорреляции развития КА в северном и южном полушариях на рисунке наглядно просматривается: в отдельные интервалы времени с ростом числа КА в одном полушарии наблюдается падение числа КА в другом полушарии. Эта свойство развития КА было впервые отмечено в [4] для второй половины 21 цикла. Аналогичная тенденция видна и в первой половине исследуемого цикла.

Северно-южную асимметрию развития активности удобно описывать с помощью коэффициента асимметрии [95;77].

$$K = (N_n - N_s) / (N_n + N_s),$$

рассчитанного для каждого кэррингтоновского оборота. Здесь, как и ранее, N_n и N_s – число ядер КА соответственно в северном и южном полушариях для данного оборота. При максимальной асимметрии (в одном из полушарий отсутствуют КА) $K = 1$ или $K = -1$. При равенстве количества северных и южных ядер КА $K = 0$, при доминировании КА в одном из полушарий значения модуля K оказываются в пределах от 0 до 1. Результаты приведены на рис. 2.3.



Рис. 2.3. Вариации коэффициента асимметрии числа ядер КА в 21 цикле

Из рисунка видно, что коэффициент асимметрии K квазипериодически менял знак – ядра КА преваляировали поочередно то в северном, то в южном полушарии.

Обратимся к интегральным свойствам КА в 21 цикле. Поскольку в предыдущих работах эти свойства были определены для 22 и 23 циклов [44] и отчасти для 24 цикла [42, 73], есть смысл рассмотреть эти циклы в сравнении. Характеристики КА для 21 цикла, определенные по данным нового каталога, приведены в первой строке таблицы 2.4. Параметры 22 и 23 циклов взяты в работах [15; 73], параметры 24 цикла выведены по каталогу КА, завершеному в 2020 году, после завершения цикла. Таким образом, получена возможность сравнения четырех циклов в рамках используемого подхода (см. таблицу 2.4).

Таблица 2.4 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

В столбце 2 таблицы 2.4 приведена продолжительность цикла, выраженная в кэррингтоновских оборотах; количество оборотов, в которых наблюдалось хотя бы одно ядро КА, указано в столбце 3. Среднее число ядер КА, приходящееся на один оборот, указано в четвертом столбце. Значения средней удельной мощности ядра КА (суммарной мощности P ядер КА в данном обороте, отнесенной к числу n ядер КА в этом обороте) указаны в столбце 5. В столбце 6 приведены значения интегральной мощности P ядер КА в цикле, просуммированной по всем оборотам. В столбце 7 указана средняя мощность ядер КА, приходящаяся на один оборот.

Среднее число ядер КА, наблюдаемых в течение одного оборота (столбец 4), было максимальным в исследуемом 21 цикле (5,89). Средняя удельная мощность ядра КА в обороте монотонно уменьшается от цикла к циклу. 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 [32].

Отметим, что наблюдается тенденция к снижению интегральной мощности ядер КА (столбец 6). Если допустить, что в мощности КА проявляется правило Гневышева-Оля, имеет смысл сравнение параметров не соседних циклов, а соседних четных и соседних нечетных. В обеих парах 21-23 и 22 – 24 циклы видна тенденция к уменьшению суммарной мощности КА в циклах.

Соответственно, падает средняя мощность КА, приходящаяся на один оборот (столбец 7). Самым высоким был этот параметр в 21 цикле (7,53), самым низким – в 24 цикле (5,44).

Следует обратить внимание еще на одно феноменологическое свойство АО, формирующихся в ядрах КА. В 21 цикле неоднократно отмечалось расположение двух (иногда более) АО на практически одной и той же долготе, но на разных широтах в одном и том же полушарии, на расстоянии 5 – 10 гелиографических градусов друг от друга. Такие случаи превалировали в ядрах КА, иногда (реже) – в ветвях КА. Такие случаи (иногда по несколько раз, т.е. на разных оборотах) наблюдались в 44 ядрах КА 21 цикла из 123 (36%).

На рис. 2.4 приведена гистограмма распределения ядер КА в 21 цикле по продолжительности жизни, выраженной в кэррингтоновских оборотах. Согласно используемому определению ядра КА, продолжительность их существования не может быть меньше 3 оборотов. Аналогичные оценки выполнены для ядер КА в 22, 23 и 24 циклах [48;73], но только в 21 цикле количество «четырёхоборотных» ядер КА превышает число «трехоборотных» – в 22-24 циклах последних оказывается заметно больше.



Рис.2.4. Распределение ядер КА в 21 цикле по продолжительности существования, выраженной в кэррингтоновских оборотах

В результате настоящего исследования определены характеристики КА, которые были идентифицированы в рамках подхода, разработанного иркутской школой. Статистика КА увеличилась с трех до четырех проанализированных циклов солнечной активности – добавились данные о 21 цикле, выполнено сравнение параметров КА в 21 цикле с параметрами этих образований в 22-24 циклах.

В целом (в первом приближении) можно констатировать, что характеристики КА во всех четырех циклах сходны. В течение цикла возникает примерно 50-70 ядер КА в каждом (северном и южном) полушарии. Возникновение КА происходит импульсно – число ядер КА увеличивается, и затем спадает, после чего наблюдается новый импульс. Продолжительность каждого импульса составляет 15-20 кэррингтоновских оборотов, в каждом полушарии наблюдаются 5 – 6 подобных импульсов в течение цикла. С учетом временного сдвига (проявления северно-южной асимметрии), характерного для всех изученных циклов, суммарные импульсы развития КА на Солнце оказываются несколько более продолжительными (около 20 - 25 оборотов), что, по-видимому, является основой (причиной) известных квазидвухлетних вариаций солнечной активности [11;32].

При более подробном рассмотрении можно обнаружить некоторые различия в поведении КА от цикла к циклу. Продолжительность существования ядер понемногу спадает: постепенно становится все больше короткоживущих КА, существующих не более трех кэррингтоновских оборотов подряд, уменьшается число долгоживущих структур. Позже (по отношению к началу цикла, определяемому по среднемесячным числам Вольфа) появляются первые КА в цикле: (через 6 оборотов в 21-22 циклах, через 13-14 оборотов в 23 и 24 циклах). Флуктуируя, спадает комплексный параметр «мощность ядра КА», учитывающий как площадь АО в ядре КА, так и количество АО, наблюдаемых на протяжении одного оборота в данном ядре КА. Постепенно уменьшается средняя удельная мощность ядра КА в обороте. По-видимому, с учетом того, что в КА наблюдаются наиболее крупные АО, этот факт как минимум не

противоречит отмеченной в 24 цикле особенности – понижению количества крупных групп пятен, отличающихся большим магнитным потоком [98]. В отличие от 21 цикла, в 24 цикле было существенно меньше ядер КА, чья мощность была оценена значениями индекса мощности P 2,5 и 3. В 21 цикле наблюдалось и самое большое среднее число ядер КА, наблюдавшихся в течение одного оборота, в последующих циклах этот параметр был ниже.

По-видимому, эти особенности динамики активности КА от цикла к циклу подтверждают тезис В.Н.Ишкова о том, что Солнце вступает в эпоху «низких» циклов [20]. Поскольку АО, развивающиеся в составе КА, являются важной частью всей популяции групп солнечных пятен, их динамика во многом определяет пятнообразовательную деятельность Солнца.

Следует обратить внимание на чередование более высоких и более низких значений ряда параметров КА, что может быть связано с проявлением правила Гневнышева-Оля, как правило, выводимого по числам Вольфа [11]. В работе [42] было показано, что индексы «число Вольфа» и «мощность КА» хорошо коррелированы, поэтому такая гипотеза представляется авторам разумной.

Разумеется, следует иметь в виду (и автор это четко осознаёт), что статистика крайне невелика (изучены по единой методике всего 4 цикла), и выводить долговременные тренды на основе анализа вариаций от цикла к циклу было бы некорректно. Пока можно говорить только о предварительных выводах, и если средние (типичные) свойства КА анализом данных о КА в 21 цикле уверенно подтверждаются, то говорить о долговременных тенденциях к их изменениям от цикла к циклу пока можно лишь с большой осторожностью.

2.3 Рентгеновские вспышки в КА

В настоящем разделе приведены результаты изучения статистики солнечных вспышек различных классов, имеющих отношение к КА. Анализу подверглись все рентгеновские вспышки классов от M0 до X+, 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.

2.3.1. 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 [4], из их числа были выделены АО, развивавшиеся в ядрах и ветвях КА. Эти АО были занесены в каталог КА, описание каталога приведено в работе [50].

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. [51;47]

Таблица 2.5 Значения индекса мощности ядер КА

Баллы	Описание пятен в ядре КА	Аналог цюрихской классификации групп пятен
0.5	Одна либо две группа пор без биполярной структуры	А, В либо А + А
1	Одна группа пятен, включающая пятно с полутенью либо три группы пор	С либо А + А + А либо В + В
1,5	Группа пятен с двумя и более пятнами с полутенью, либо с одним крупным пятном, или две небольшие группы	С + (А или В) или Е или С + С или J или Н

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-сателлитами рядом с ней	F > 20°

Для изучения свойств активности пятен, включая КА, были построены синоптические карты для каждого кэррингтоновского оборота 24 цикла, начиная с 2009 по 2213 обороты. Как указано выше, на карты были нанесены группы пятен в состоянии, близком к фазе максимального развития по данным собственных наблюдений фотосферы Солнца в астрономической обсерватории ИГУ, дополненным наблюдениями космической обсерватории SDO. С использованием синоптических карт и методики площадок длительной активности [42; 51;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 каталог, на основе которого автором была создана специальная база данных.

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 (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), рис. 2.5. Вне КА развивались 685 АО (39,8%).

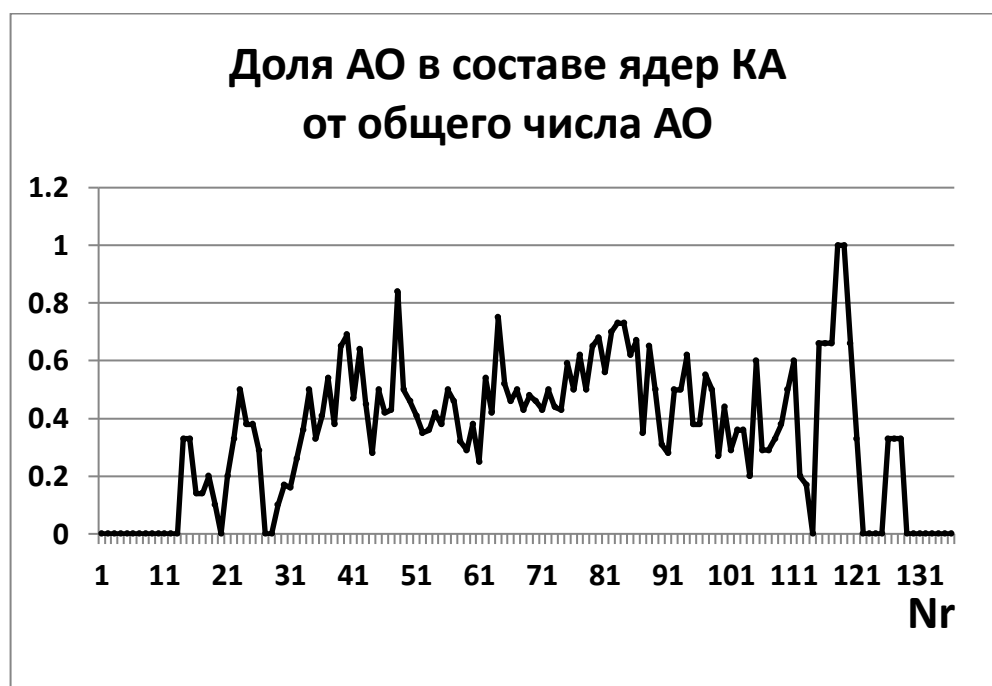


Рис.2.5. Отношение числа АО в составе ядер КА к полному числу АО в 24 цикле. По оси абсцисс отложено время в кэррингтоновских оборотах Nr, начиная от начала цикла.

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.

На рис. 2.6 показано, как менялось со временем количество ядер комплексов КА в ходе 24 цикла активности отдельно для северного Np и для

южного N_s полушарий Солнца. Ядрам КА южного полушария приписаны отрицательные значения.

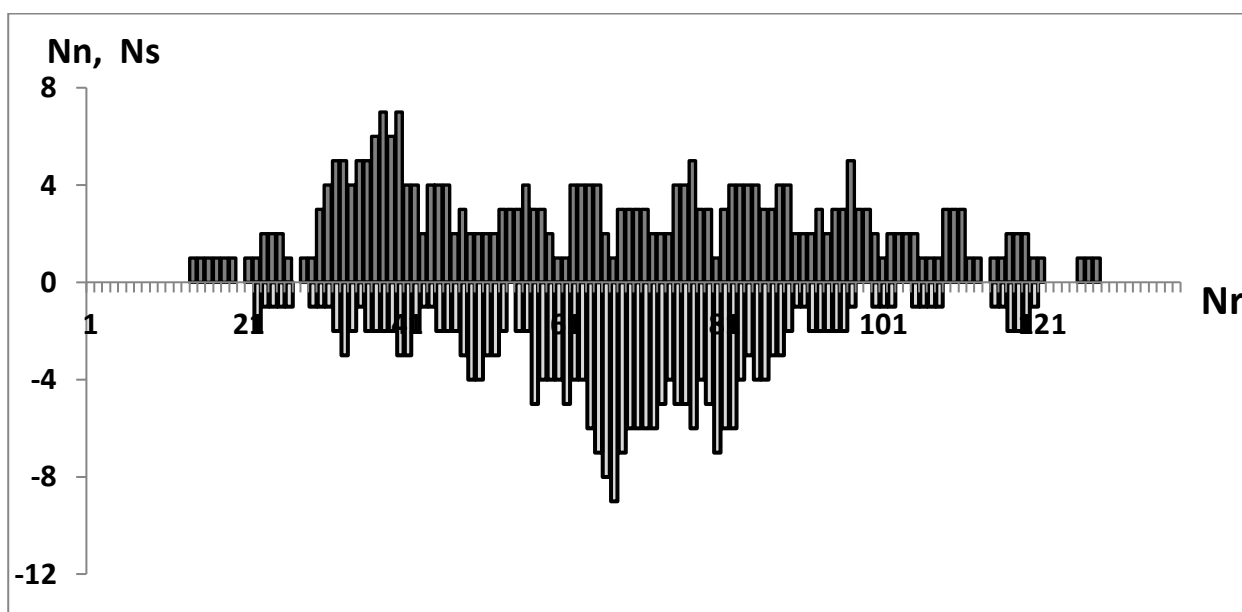


Рис.2.6 Количество ядер КА в 24 цикле. Вверху – северное полушарие, внизу – южное полушарие.

Рисунок демонстрирует существенную северно-южную асимметрию развития ядер КА в 24 цикле. Максимум числа КА в северном полушарии отмечен в 2012 году, 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 индексами КА n и P , отмеченную в работе [44].

На рис.2.7. приведено распределение ядер КА в 24 цикле по продолжительности существования.

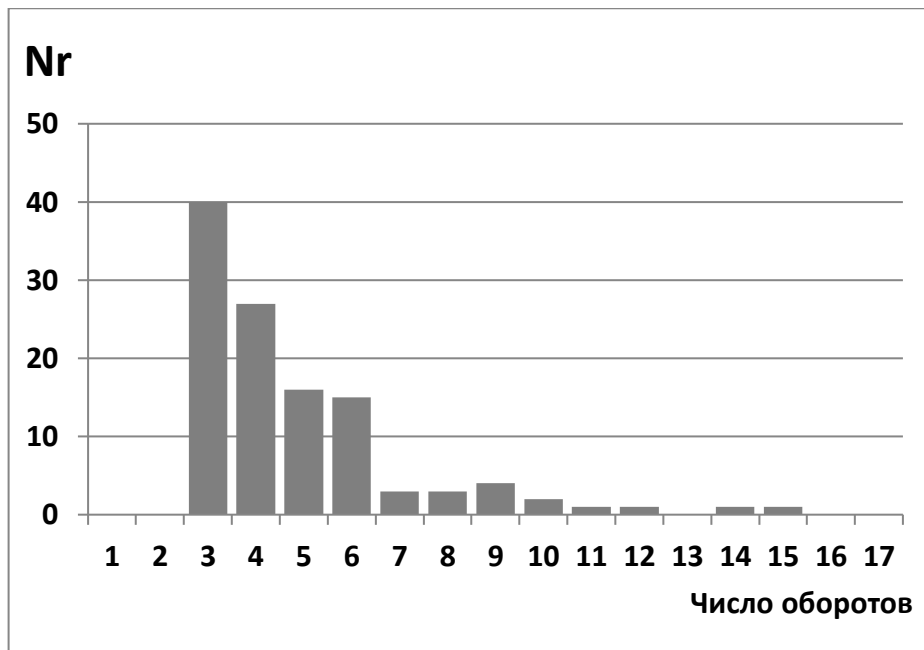


Рис. 2.7 Распределение ядер КА в 24 цикле по продолжительности жизни

Согласно применяемому определению КА [42], ядер КА, существующих на протяжении одного или двух кэррингтоновских оборотов, не существует. Основная часть ядер КА существует на протяжении 3—6 оборотов. Немногочисленным более длительным случаям соответствует длинный плоский «хвост» распределения.

2.3.2. Рентгеновские вспышки в комплексах активности

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 M0.

Всего в рассматриваемый период 24 цикла были зафиксированы 744 вспышки MХ - классов, в том числе 310 в северном полушарии и 434 в южном (южное полушарие оказалось существенно 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).

Для оценки энергетики солнечных вспышек применяется еще один индекс. Как известно (например, см. [21]), с 1976 г. в качестве такого индекса используется фоновое значение потока мягкого рентгеновского излучения Солнца в диапазоне 0.1 – 0.8 нм (12.5 эВ – 1 кэВ) по данным спутников серии 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

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

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

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

где n ограничено возможностями сенсора. На основании этой номенклатуры были введены следующие классы для рентгеновских вспышек. Малыми называются все вспышки баллов В и С. Средние вспышки – все вспышки в пределах от М1 до М4,9 ($M1 - 10^{-5}$ Вт/м², $M4,9 - 4.9 \times 10^{-5}$ Вт/м²). Все вспышки больше М5 считаются большими или сильными ($M5 - 5 \times 10^{-5}$ Вт/м²). Запись «вспышечный индекс данной вспышки равен М7,6» означает, что излучение во время максимума ее развития соответствовало величине $7,6 \times 10^{-5}$ 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 для каждой вспышечно-активной области в 24 цикле, генерировавшей хотя бы одну вспышку МХ -классов. Характеристики вспышечной активности в 24 цикле приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 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 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

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/N_f 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. 2.6, 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. 2.7.

Таблица 2.7. Продуктивность вспышечноактивных 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

В табл. 2.7 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.

2.4 LDE-вспышки в 24 цикле

В числе солнечных вспышек выделяется особый класс LDE (Long Decay Events) событий, отличающихся продолжительной (более 4 часов) фазой спада мягкого рентгеновского излучения. События такого класса исследовались рядом авторов [55;56;57]. В работе [8] впервые была продемонстрирована значимая корреляция числа LDE- вспышек с параметрами (количеством и мощностью) комплексов активности – 87% по данным 21 цикла. В нашей работе [17] 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. 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. 2.8.

Таблица 2.8 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%	

Ранее полученные данные [17] подтверждаются: 87% LDE-вспышек рентгеновских классов М и Х наблюдались в КА.

В числе LDE- вспышек 16 (25% от общего количества) относятся к рентгеновскому классу Х. Распределение этих вспышек оказалось подобным распределению, приведенному в предыдущей таблице, таблица 2.9:

Таблица 2.9 LDE-вспышки X-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%	

2.5 Связь рентгеновских вспышек с комплексами активности

В результате проведенного исследования вспышечной деятельности в 24 цикле уверенно подтверждается ранее сделанный [113] 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. средняя

мощность КА в 24 цикле оказалась самой низкой из трех последних циклов. 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.

Таким образом, статистика свидетельствует о значимой роли КА в генерации средних и сильных рентгеновских 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 [51;52], 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 [113]. 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 [92;93]. 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

многим 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 [51]. Во-первых, это долговременное существование (вплоть до 17 солнечных оборотов, [47]). 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 [16]. 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 синодическим 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 [16], образует структуру с ячейками, размеры которых составляют $20-40^\circ$ (240–480 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 [89] 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 [92;93;32]. 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 автора, неплохо согласуется с выдвинутыми ранее гипотезами Иванова (описана выше, [16]), а также Сидорова и Язева [51;47;53;54]. В последней гипотезе речь идет о связи ядер КА с крупномасштабными конвективными ячейками, возможно, закрепленными в недрах конвективной зоны, возможно, вблизи уровня тахоклина. Предположительно именно 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 некэррингтоновским 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 корональных дыр [75]. Этот вопрос требует отдельного изучения и будет рассмотрен в нашей следующей работе.

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. Ядра КА, вероятно, 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.

2.6 Выводы к главе 2

В главе 2 «Рентгеновские вспышки и комплексы активности» приведены результаты исследований, посвященных поиску статистической связи между активными областями, развивающимися в составе комплексов активности на Солнце, и рентгеновскими вспышками разных классов. В частности:

- выполнена идентификация комплексов активности в первой половине 21 цикла. Составлен соответствующий каталог. На базе полученных данных выполнен анализ параметров комплексов активности в 21 – 24 циклах;
- выполнен статистический анализ связи активных областей в составе ядер и ветвей комплексов активности и рентгеновских вспышек классов М и Х. Показано, что до 87% всех рентгеновских вспышек локализованы в комплексах активности;

- показано, что этот вывод характерен и для LDE-событий, которые происходят преимущественно в комплексах активности;
- обоснована гипотеза о том, что активные области в ядрах комплексов активности развиваются в пределах расположенных глубоко в конвективной зоне крупномасштабных конвективных ячеек, для которых характерна кэррингтоновская скорость вращения. Активные области, представляющие собой ветви комплексов активности, связаны с приповерхностными слоями конвективной зоны и подвержены дифференциальному вращению;
- повышенная вспышечная активности активных областей в составе комплексов активности предположительно связана с взаимодействием разновозрастных магнитных систем активных областей, последовательно возникающих на одном и том же месте в кэррингтоновской системе координат.

Глава 3. Сильные протонные вспышки и комплексы активности

3.1 Введение

Протонные вспышки, которые сопровождаются большими потоками энергичных протонов (протонные события), относятся к разряду наиболее сильных геоэффективных явлений, происходящих на Солнце. Подобные события экстремальной мощности неоднократно приводили к сильным возмущениям в околоземной среде и в атмосфере Земли, включая и техносферу [18;112]. Изучение характеристик потоков энергичных частиц от вспышек, условий выхода из атмосферы Солнца и их геоэффективность является одной из наиболее важных задач солнечно-земной физики.

По целому ряду наблюдаемых параметров вспышки на Солнце принято разделять на два класса: импульсные и длительные события, которые отличаются друг от друга продолжительностью рентгеновской эмиссии и характеристиками ускоренных частиц, составом элементов, зарядовыми состояниями ионов в солнечных космических лучах (СКЛ) и пр. (например, [78; 79]). Соответственно, события СКЛ также разделяются на импульсные и длительные явления (согласно классификации вспышек, основанной на длительности эмиссии в мягком рентгеновском диапазоне). Вспышки СКЛ, относящиеся к классу продолжительных событий, приводят к наиболее мощным и длительным потокам ускоренных частиц, поскольку именно в них проявляются оба основных механизма ускорения частиц: электрическими полями в области выделения энергии вспышки и ударными волнами, возбужденными быстрыми корональными выбросами массы (КВМ).

Согласно современным представлениям, возникновение вспышек и сопутствующих им выбросов плазмы тесно связано с нарушением равновесия магнитных конфигураций активных областей (АО) и комплексов активности (КА) в ходе их эволюции. На фазе развития АО структура их магнитных полей становится сложнее, возникают X – точки, вблизи которых формируются

токовые слои, и, благодаря механизмам пересоединения магнитных полей, включаются процессы диссипации свободной магнитной энергии. Выделение накопленной в магнитных структурах свободной энергии в токовых слоях приводит к вспышечному процессу с интенсивным нагревом плазмы, ускорением энергичных частиц и выбросам плазмы [2;106;107]. Возможно также, что в ситуации, когда магнитная система АО уже находится на пороге устойчивости, внешнее воздействие (например, поток альфвеновских волн) тоже может привести к возникновению вспышки.

После начала постоянного мониторинга потоков солнечных протонов внеатмосферными обсерваториями (с 1976 г.) ведется каталог наиболее сильных событий, влияющих на природную среду. Вспышки, включенные в этот каталог, отбираются по числу энергичных событий (с энергией частиц более 10 МэВ) (более 10 регистраций частиц в секунду на квадратный сантиметр в единичном телесном угле на орбите Земли).

Тот факт, что протонные вспышки на Солнце возникают преимущественно не в отдельных активных областях, а в конгломератах АО – комплексах активных областей [19] или долгоживущих КА [3], известен сравнительно давно. В работах [72;47;51;42] показано, что подавляющее большинство вспышек, внесенных в каталог [26], действительно регистрируется не в индивидуальных АО, а именно в КА.

В данной главе диссертационной работы рассмотрены обстоятельства, при которых возможно возникновение протонных вспышек. В дальнейшем в данной статье термин «вспышки» будет относиться только к событиям, отобранным из каталога [26]. Кроме того, обсуждаются вопросы, связанные с выходом энергичных частиц из магнитных конфигураций КА благодаря возникновению «магнитных каналов».

3.2 Рентгеновские классы протонных вспышек

На рис.3.1 показано распределение индексов вспышек рентгеновского класса, взятых из каталога [26]. Для анализа была использована неполная выборка событий, поскольку для некоторых вспышек за лимбом Солнца остается неизвестным их рентгеновский класс. Наблюдается естественная тенденция к росту потоков протонов по мере увеличения рентгеновского балла события (линейный коэффициент корреляции равен 0.38), хотя дисперсия достаточно велика. Из рис. 3.1 следует, что сильные потоки энергичных протонов связаны не только со вспышками, отличающимися высокими рентгеновскими баллами, но и со слабыми вспышками рентгеновского С класса. 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 некоторых иных факторов [17]. Результаты поиска вкладов этих факторов изложены в следующих разделах работы.

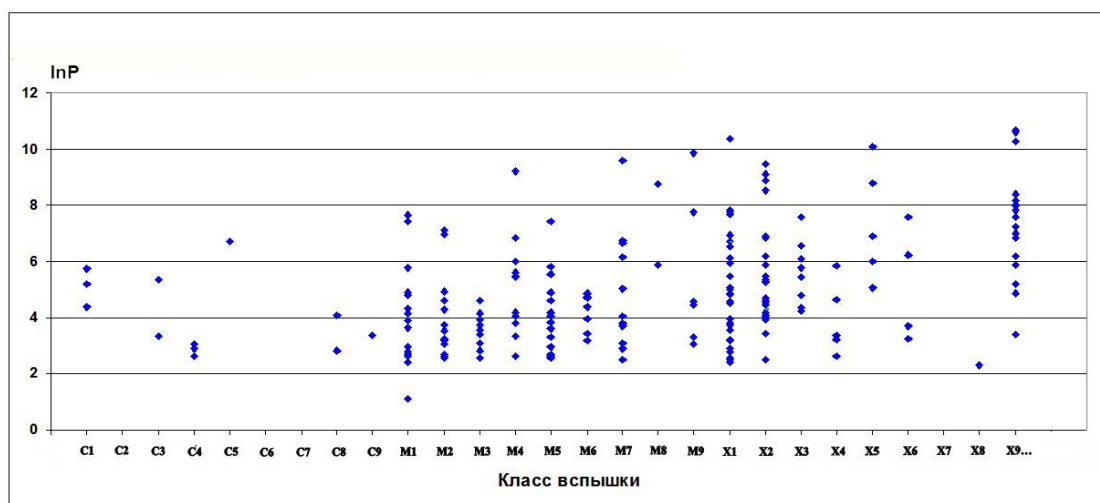


Рис. 3.1. Зависимость натурального логарифма потока энергичных протонов в единицу времени от рентгеновского класса породивших их вспышек

3.3 Протонные вспышки и комплексы активности

За период времени, начиная с января 1980 г. и вплоть до марта 2017 г., выполнено сопоставление областей локализации исследуемых вспышек с положением КА. Результаты анализа приведены в таблице 3.1. В первом столбце таблицы указан номер цикла (21 цикл – начиная с января 1980 г., 24 цикл – до сентября 2016 г.). Второй столбец содержит параметр N_c (количество вспышек в ядрах КА). В третьем столбце приведены значения параметра N_b (количество вспышек в ветвях КА), в четвертом столбце – параметра N_w (число вспышек, не относящихся к КА); в пятом столбце – доля вспышек, относящихся к КА ($N_c + N_b$) в процентах от общего числа вспышек в цикле активности.

Из таблицы 3.1 следует, что вспышки рассматриваемого класса возникают, прежде всего, в комплексах активности – в ядрах КА (57% за весь исследуемый период времени), либо в ветвях КА (27%). Вспышки, происходящие за пределами КА в отдельных АО, составляют всего 16% от общего количества тех событий из каталога [26] (190 за рассматриваемый период времени), для которых известны их координаты на поверхности Солнца.

Таблица 3.1. Связь протонных вспышек с комплексами активности

<i>цикл</i>	N_c	N_b	N_w	$N_c + N_b$ (%)
21	14	12	9	74.3
22	32	14	9	92.5
23	41	21	5	83.6
24	22	5	6	81.8

В то же время очевидно, что наличие КА на Солнце само по себе не гарантирует появления вспышек. В ходе развития 24 цикла активности (январь 2009 г. – январь 2017 г.) из 105 ядер КА, идентифицированных по методике [51, 42], (58 - в северном полушарии и 47 - в южном), только в двадцати из них (13 в

северном и 7 в южном полушарии) произошли вспышки рассматриваемого типа, в том числе, в шести ядрах КА – по 2 вспышки и в одном ядре КА – 3 вспышки. Таким образом, в 24 цикле лишь около 19% ядер КА (20 из 105) оказались способными генерировать протонные события рассматриваемого типа. Близкое соотношение характеризует и предыдущий, 23 цикл активности [47].

Большая часть вспышек (около 60%) происходит в течение трех первых оборотов существования ядра КА (рис. 3.2) (по 161 событию, локализованном в КА в 1980 – 2016 гг.).

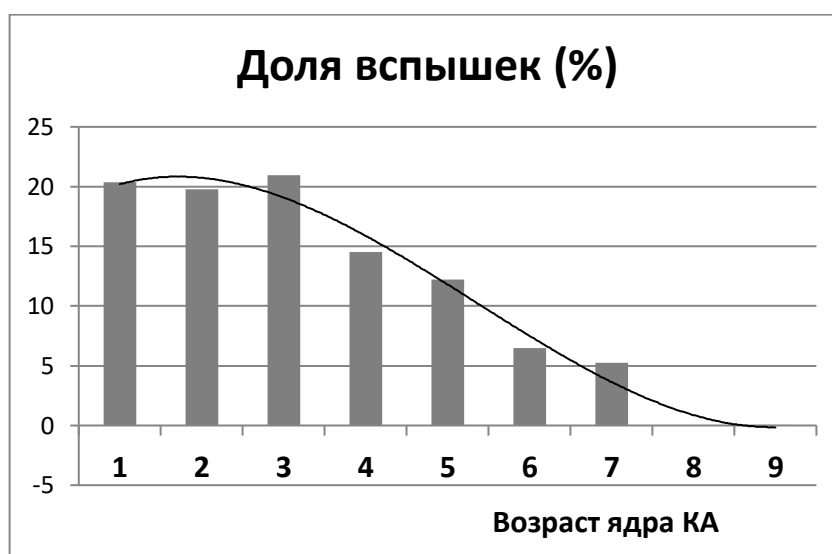


Рис. 3.2. Распределение вспышек в КА по возрасту ядер КА (возраст указан в кэррингтоновских оборотах)

Согласно данным о КА в 23 цикле [16], короткоживущие ядра КА (по определению [51;42], ядра КА существуют не менее трех оборотов) дают небольшой вклад в процесс генерации вспышек рассматриваемого типа (рис. 3.3). На рис. 3.3 показана зависимость параметра S – числа вспышек, нормированного на число ядер КА, от параметра T - продолжительности существования ядер КА в 23 цикле. Вспышечная продуктивность короткоживущих (время жизни – три оборота) ядер КА невелика: лишь в 15% случаев

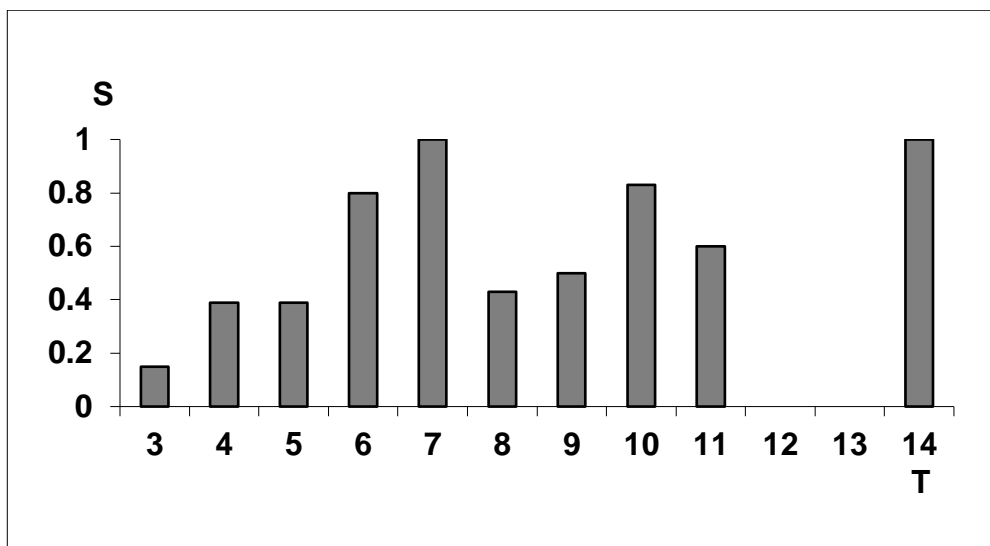


Рис. 3.3 Зависимость приведенного числа вспышек в КА от продолжительности существования КА по данным 23 цикла

в таких КА наблюдаются вспышки. С ростом продолжительности жизни КА их способность порождать вспышки возрастает. Так, например, КА, наблюдавшиеся на протяжении шести оборотов, производят вспышки в 80% случаев. Часть распределения, относящаяся к более долгоживущим КА (время жизни свыше 8 оборотов), недостаточно достоверна из-за малой статистики.

3.4 Протонные вспышки и корональные дыры

С точки зрения автора, анализ особенностей локализации вспышек позволяет выделить важную закономерность. При наложении кэррингтоновских координат вспышек в 24 цикле на синоптические карты, которые составляются группой сети глобальных осцилляций (GONG) Национальной солнечной обсерватории США [27], выяснилось, что все 39 вспышек, для которых были определены их координаты в ходе развития 24 цикла, произошли вблизи границ корональных дыр (КД). Отметим, что практически все вспышки из каталога [26] сопровождалось выбросами КВМ.

Этот результат проиллюстрирован на рис. 3.4. Кратчайшие расстояния от вспышки до границы ближайшей КД, определенные по картам [26], были

разбиты на 9 интервалов, каждый интервал составлял 60 Мм (несколько менее 5°). Согласно рис. 3.4, почти 80% вспышек из выборки оказались расположенными на расстояниях, не превышающих 240 Мм, или меньше 20° (характерный размер ядра КА). Учитывая, что типичная протяженность вспышечных поярчений в крупных вспышках при наблюдениях в линии На имеет сходные размеры, а яркие вспышечные рентгеновские арки нередко превышают этот предел как по расстоянию между основаниями петель, так и по высоте [51], можно считать, что вспышки рассматриваемого класса происходят вблизи КД. Максимум распределения расстояний от вспышки до ближайшей КД лежит в пределах от 60 до 120 Мм (рис.3.4).

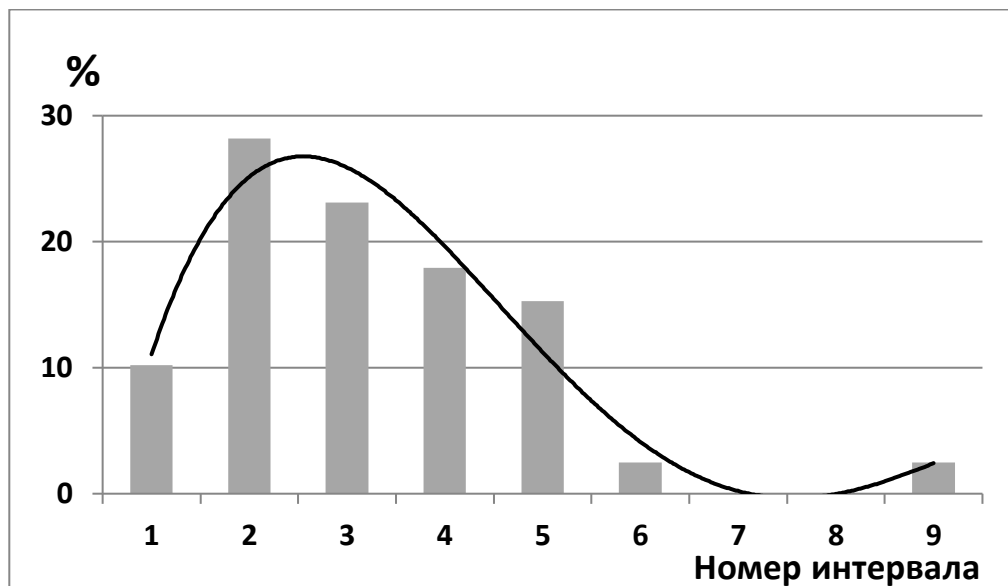


Рис. 3.4. Зависимость расстояния от вспышки до ближайшей корональной дыры в 24 цикле активности

Оценка расстояния между вспышкой и границей ближайшей КД, несомненно, отягощена значительными погрешностями. Координаты вспышки оцениваются по положению центра яркости на эпохе максимума, при этом сама вспышка может быть (и, как правило, бывает) достаточно протяженным образованием – порядка десяти и более гелиографических градусов (120 Мм и более). Границы корональной дыры, определяемые разными методами (по наблюдениям в разных спектральных диапазонах) проявляются также по-разному, и ошибка метода бывает существенной (порядка нескольких

гелиографических градусов, т.е. десятков мегаметров). Кроме того, конфигурация КД на протяжении одного кэррингтоновского оборота может существенно меняться, в то время как на синоптических картах фиксируется мгновенное положение КД во время прохождения через центральный меридиан. Тем не менее, расстояния, измеренные в единой системе, показывают, что для всех вспышек из каталога [8], наблюдавшихся в ходе 24 цикла, поблизости (на расстоянии не более характерного размера крупной вспышки) обязательно находилась хотя бы небольшая корональная дыра.

На рис. 3.5 показано распределение расстояния до ближайших КД для рентгеновских непротонных вспышек классов М – Х в течение 24 цикла, наблюдавшихся в АО вне КА (всего 30 событий). Видно, что закономерности, подобной показанной на рис. 3.4, нет – количество таких событий не показывает зависимости от расстояния до ближайшей КД.

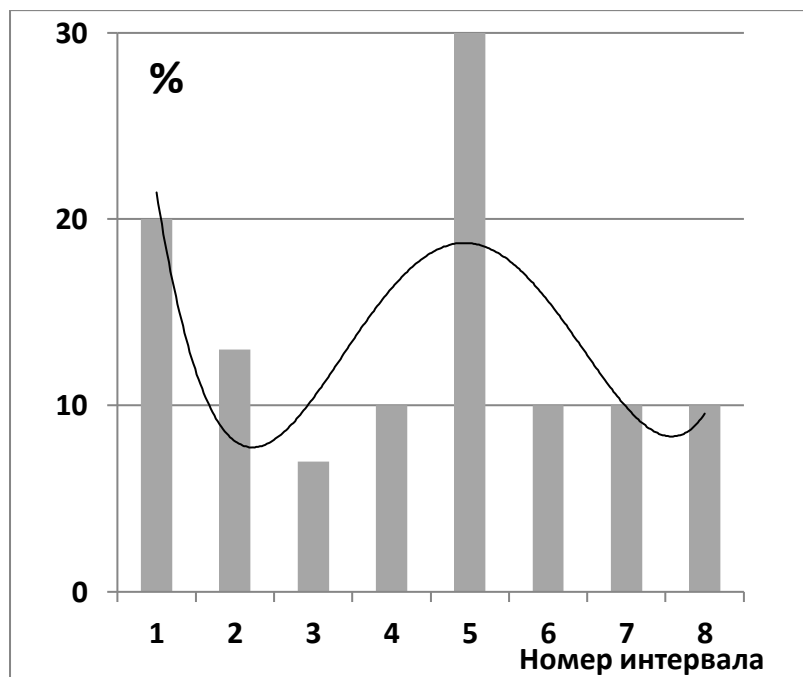


Рис. 3.5. Зависимость расстояния от рентгеновской вспышки в АО вне КА до ближайшей корональной дыры в 24 цикле активности

Согласно статистике 24 цикла, вспышки из каталога [27] составляют незначительную часть от общего количества вспышек с баллами, начиная с С5 в

рентгеновском диапазоне. Рис. 3.5 показывает, что для всей совокупности рентгеновских вспышек такая особенность (большие потоки энергичных протонов, регистрируемые на орбите Земли) не является характерной. Вполне правомерна гипотеза, что именно присутствие открытой магнитной конфигурации - корональной дыры вблизи зоны вспышки является эффективным фактором, способствующим выходу в гелиосферу потока ускоренных частиц. В то же время не исключено, что наличие корональной дыры вблизи КА может способствовать и возникновению вспышки.

Вопрос о связи вспышек, сопровождающихся выходом энергичных частиц в гелиосферу, с КД, в свою очередь, тесно связан с топологией магнитных полей в зонах вспышек, с их магнитным окружением и нуждается в дополнительном обсуждении.

Энергетические характеристики и временные масштабы потоков солнечных энергичных частиц как от импульсных вспышек, так и, в особенности, от продолжительных событий с выбросами КВМ, зависят не только от механизмов ускорения, но и от крупномасштабных корональных и межпланетных магнитных структур, в которых распространяются СКЛ.

Традиционно считалось, что наличие КД вблизи АО, генерирующих вспышки и выбросы КВМ, может оказывать сильное влияние на события СКЛ. В то же время результаты ряда работ [81;103;104;80] оказались довольно противоречивыми. Так, например, в работе [81] было показано, что присутствие КД между областью локализации вспышки и подножием спирали Паркера сказывается на задержке прихода потоков частиц СКЛ к отдаленному наблюдателю. В работах [103;104] признаков влияния соседних КД на характеристики СКЛ в межпланетной среде не было обнаружено, в работе [80] не удалось найти свидетельств влияния КД на пиковые интенсивности и моменты приходов СКЛ к Земле. Тем не менее, авторы упомянутых работ считают, что связь положения КД и СКЛ должна существовать, обсуждая препятствующие этому факторы, в том числе, недостаточность выборки явлений СКЛ, различия в определении границ КД разными методами и т.д. . Кроме того,

в указанных работах не была учтена возможная роль обменного пересоединения между магнитными структурами АО и КД, которая учитывалась в работах других авторов.

Обратимся к обсуждению результатов, изложенных в настоящем разделе главы. В отличие от работ упомянутых авторов, рассмотрены и импульсные события.

Фактор корональных дыр. Представляется (автору) вполне вероятным, что одним из важных факторов является обязательная близость КД к вспышечноактивной АО. Для 39 протонных вспышек исследуемого типа КД оказались поблизости от АО во всех случаях. Это были и «рукава» полярных КД, и небольшие низкоширотные изолированные КД. Следует оговориться, что использовавшиеся синоптические карты изготовлены по окончании соответствующего кэррингтоновского оборота, поэтому вопрос о том, существовала ли КД во время вспышки или сформировалась позднее (возможно, в результате вспышки), требует отдельного рассмотрения, которое предполагается выполнить в следующей работе.

Сходный вывод был сделан в работе Wang et al. [109]. Источники 25 импульсных событий СКЛ, наблюдавшиеся в период с 1997 по 2003 г.г., располагались вблизи границ КД, содержащих направленные к Земле линии открытого магнитного поля. Среднее расстояние на фотосферном уровне между источником СКЛ и корональной дырой, усредненное по всем рассмотренным событиям, составило около 4° (~ 50 Мм).

Сам источник СКЛ обычно являлся небольшой вспышечно-активной областью, располагающейся в пределах $25-72^\circ$ к западу от центрального меридиана на диске Солнца. Кроме этого, Wang et al. [109] обнаружили, что в пределах интервала времени инъекции энергичных частиц на изображениях источников в крайней ультрафиолетовой области спектра (КУФ) часто наблюдались рекуррентные плазменные выбросы, направленные вдоль линий открытого магнитного поля, которые изредка прослеживались и в белом свете

вплоть до больших гелиоцентрических расстояний. Эти выбросы были узкими ($\sim 30^\circ$) и быстрыми (со скоростями от 500 до 1000 км/сек) [109].

В работе Nitta et al. [94], также посвященной поиску областей локализации импульсных событий СКЛ на Солнце, была сделана попытка отождествления областей источников СКЛ по данным об энергичных ионах в диапазоне энергий 2-3 МэВ/нуклон. Кроме того, использовались данные о радиовсплесках III типа, возникших в пределах пятичасового интервала времени, предшествующего появлениям потоков энергичных ионов. По результатам анализа удалось отождествить источники 69 явлений из 117. Оказалось, что в 80% случаев источниками СКЛ были магнитные структуры с открытым полем (КД).

Авторы обеих цитируемых работ [109;94] пришли к заключению, что импульсные вспышки, ответственные за явления СКЛ, возникают вблизи поверхности раздела между АО и соседними КД и являются результатом «обменного» магнитного пересоединения между соседними областями с замкнутым и открытым магнитным полем. В ходе процесса «обменного» пересоединения нагретая плазма и ускоренные частицы передаются от замкнутых к открытым линиям магнитного поля и получают возможность выхода в гелиосферу. Процесс магнитного пересоединения также сопровождается «узкими» направленными выбросами плазмы. Таким образом, КД не только формируют каналы для выхода энергичных частиц в межпланетное пространство, но, возможно, и сами инициируют вспышки благодаря процессам обменного пересоединения на границе КД и близлежащей АО.

Следует отметить, что работы [109;94] были посвящены изучению импульсных (сравнительно кратковременных) вспышечных событий. Впервые схема разделения вспышек на импульсные и продолжительные события была предложена Паллавичини и др. в 1977 году [97]. Как правило, длительные вспышки связываются с процессами выделения энергии в протяженных корональных петельных системах КА, хотя это оказывается не обязательным правилом: в КА тоже могут происходить кратковременные импульсные события [17].

В числе рассмотренных автором протонных вспышек фигурируют события иного типа - четыре так называемых продолжительные (LDE) вспышки, рассмотренные в главе 2. Поблизости от мест их возникновения также находились КД. Это означает, что, по-видимому, КД создают условия для формирования каналов выхода частиц при любых вспышках – как импульсных, так и длительных. В то же время статистика не слишком велика и этот вывод может считаться предварительным. Тем не менее, близость КД к области генерации вспышки может рассматриваться как важный фактор, обеспечивающий возможность выброса частиц в гелиосферу.

Наличие КД по соседству со вспышечно-активными областями оказывается важным и для проявлений FIP-эффекта в составе СКЛ в импульсных событиях [30].

Дополнительным доводом в пользу гипотезы об участии канала, связанного с КД, в выбросе протонов в гелиосферу, могла бы стать повышенная скорость солнечного ветра вне магнитосферы Земли перед соответствующим протонным событием. Это исследование предполагается выполнить в будущем.

Фактор корональных выбросов массы. Еще одно важное свойство протонных вспышек рассмотренного типа заключается в том, что практически все анализируемые вспышки сопровождались корональными выбросами массы (КВМ).

Известно, что продолжительные вспышечные события с проявлением ускорения частиц ударными волнами происходят в сложных магнитных структурах (КА), которые обычно содержат волокно магнитного потока, располагающееся над линией раздела полярностей поля в фотосфере. В ходе эволюции магнитной структуры, сопровождающейся усложнением структуры полей вследствие движений их оснований в фотосфере, волокно магнитного потока может потерять устойчивость и оказаться выброшенным вверх с ускорением, что приводит к пересоединению магнитных полей в токовом слое, возникающем в его нижней части, инициирует выброс КВМ и эмиссионные проявления вспышки.

Выброс КВМ с волокном, обычно расположенным в его центральной части, как правило, демонстрирует три фазы эволюции: (1) фазу подъема до начала вспышки; (2) фазу быстрого ускорения в короне, совпадающую со стадией роста излучения вспышки; и, наконец, (3) стадию распространения с постоянной или же с медленно уменьшающейся скоростью после выхода из короны [114]. Наиболее высокоскоростные выбросы КВМ (>2000 км/с) способны возбуждать ударные волны в короне и в межпланетной среде, которые могут эффективно ускорять частицы (угловые ширины выбросов КВМ в таких событиях превышают 100°). В работе [67] было показано, что ударные волны могут образоваться в короне при подъеме выброса КВМ вследствие его быстрого расширения в стороны (при этом скорости КВМ, способных генерировать ударные волны, могут быть и меньше, до > 1000 км/с) [67; 65]. Кроме того, нельзя исключить возможность проникновения энергичных частиц в пограничные области КД и даже их попадания в пределы КД вследствие ускорения взрывными ударными волнами на флангах выбросов КВМ [67].

Указанием на возбуждение ударных волн в солнечной короне может служить также появление радиовсплесков II типа в метровом диапазоне длин волн при быстром подъеме КВМ в короне [30]. В магнитной структуре, показанной на рисунке 2б в работе [30], частицы, ускоренные в токовом слое, образующемся за выбросом КВМ, проникают в плотные слои солнечной атмосферы, генерируя электромагнитное излучение и приводя к проявлениям вспышки в оптическом и рентгеновском диапазонах длин волн.

Таким образом, динамика выброса КВМ вблизи Солнца является важным дополнительным фактором, отвечающим за интенсивность потоков протонов с энергией ~ 10 МэВ, поскольку в начальной стадии подъема КВМ «запускает» вспышку и порождает корональную волну, которая инициирует ускорение протонов из области вспышки [108]. Часть ускоренных частиц удерживается в области за уходящим выбросом КВМ и образует так называемый «резервуар» («магнитную бутылку») – обширную расширяющуюся зону плазмы в межпланетной среде, заполненную энергичными частицами и турбулентностью

альфвеновских волн [99]. В ходе прохождения выброса КВМ через корону он вполне способен привести к возмущению структуры течения скоростного солнечного ветра из близлежащей КД. Позади уходящего из короны выброса обычно наблюдается тонкая светящаяся высокотемпературная плазменная структура – токовый слой. Позади токового слоя, по мере выхода КВМ в гелиосферу, магнитное поле над линией раздела полярностей в той области, где произошел выброс волокна, быстро восстанавливается, вновь приобретая замкнутый характер. Таким образом, существование магнитного «канала», возникающего вслед за выбросом КВМ оказывается относительно кратковременным.

Фактор комплексов активности. Еще одним важным с точки зрения статистической значимости фактором может являться принадлежность вспышечной активной области к комплексам активности. Этот фактор не рассматривался в работах [94;97]. При статистической обработке данных каталога [27] было выявлено, что подавляющая доля протонных событий рассматриваемого класса регистрировалась в КА (всего событий, с 1980 г. по 2016 г. – в 84% случаев), причем из них в ядрах КА было 57 % событий, а в ветвях ядер КА - 27%. Доля протонных вспышек несколько различается в разных циклах активности (в неполном 21 цикле, в 22 и 23 циклах и в неполном цикле 24), но во всех случаях она остается достаточно высокой (от 74 до 92%). Как правило, вспышки наблюдаются преимущественно в течение первых трех солнечных оборотов существования КА (примерно по 20% в течение первого, второго и третьего оборотов), –почти 75% в течение первых четырех оборотов жизни КА. Этот вывод подтверждает ранее полученные результаты [47; 17]. То обстоятельство, что именно в КА возникают наиболее мощные вспышки, неоднократно отмечалось многими авторами. Поскольку именно для КА характерен выход в одном и том же месте новых порций магнитного потока, именно здесь взаимодействие старых и новых систем магнитных полей в КА приводит к процессу пересоединения магнитных полей и вспышкам, в том числе и сильным.

Сама по себе генерация мощных вспышек в КА давно не вызывает сомнений. Актуальным остается вопрос – почему не во всех КА происходят протонные события. Возможным ответом на это вопрос является отмеченный выше фактор близости КД. В совокупности два эти фактора (КА и близость КД), как свидетельствует статистика, обеспечивают высокую вероятность сильных протонных вспышек. Это обстоятельство может быть использовано для улучшения качества прогноза протонных событий, воздействующих на природную среду.

Таким образом, можно констатировать, что на Солнце действует целый ряд механизмов, обеспечивающих выход частиц, ускоряемых во вспышках, в гелиосферу. Во время импульсных вспышек, сопровождаемых выбросами коронального вещества, на непродолжительный промежуток времени может открываться канал, обеспечивающий выход частиц. Однако статистика указывает на важный вклад КД, близко расположенных к месту вспышки. Проявления FIP-эффекта, характерного для вещества в АО и наблюдаемого в потоках частиц, говорят о том, что вспышечные частицы попадают, в том числе, не только в кратковременно открываемые, но и в долгоживущие каналы, предположительно связанные с пограничными областями КД.

3.5. Выводы к главе 3

В главе 3 показано, что сильные протонные события из каталога [27] в течение текущего 24 цикла активности происходили в активных областях, связанных с комплексами активности (в 80% случаев), и одновременно вблизи границ корональных дыр (в 100% случаев). Эти обстоятельства могут быть использованы в качестве прогностических факторов.

Глава 4. Гамма-вспышки и комплексы активности на Солнце

4.1 Введение

Гамма-излучение солнечного происхождения впервые было зарегистрировано во время мощных вспышек на Солнце 4 и 7 августа 1972 г. американской космической обсерваторией OSO-7 [105]. В настоящее время выполняется постоянный внеатмосферный мониторинг солнечного гамма-излучения. Выяснилось, что источники гамма-излучения наблюдаются сравнительно редко – порядка нескольких десятков явлений за цикл, т.е. проявляются далеко не во всех солнечных вспышках [101].

Происхождение источников гамма-излучения в солнечных вспышках традиционно связывается с ядерными взаимодействиями, при определенных условиях возникающими в солнечной атмосфере. Согласно классическим результатам [91], ускоренные во вспышках протоны и другие ионы с энергиями, превышающими 300 МэВ, при взаимодействии с плазмой солнечной атмосферы способны приводить к появлению нейтральных и заряженных пионов. В результате распадов нейтральных пионов рождаются гамма-кванты высоких энергий (>70 МэВ), образующие широкий спектр излучения с максимумом в области 70 МэВ, который иногда регистрируется детекторами на космических аппаратах. Таким образом, для возникновения гамма-излучения нужны потоки высокоэнергичных протонов при соблюдении вполне определенных условий, которые реализуются во время некоторых вспышек.

В последние годы большое внимание уделяется изучению вспышек с продолжительной фазой гамма-излучения, которые относятся к достаточно мощным и геоэффективным событиям. Они практически всегда сопровождаются быстрыми корональными выбросами массы (КВМ) типа гало. Ряд работ с участием автора [113;75] был посвящен изучению комплексов активности (КА) на Солнце и их геоэффективных проявлений. Наиболее вероятными механизмами ускорения частиц в областях действия магнитного пересоединения

считаются электрические поля, плазменная и МГД - турбулентность, а также ударные волны [2; 35].

Настоящая глава диссертационной работы посвящена исследованию связей вспышек, для которых характерна длительная фаза гамма-излучения, с КА и близкими к ним КД. Здесь приведены статистические данные об изучаемых вспышечных событиях и их связях с КА. С использованием известной модели «прорыва» развития вспышки [69;58]), приведены аргументы в пользу локализации областей наиболее эффективного ускорения частиц, которое может привести к появлению гамма – излучения. Здесь же выполнено сопоставление этих явлений с изменениями магнитной топологии в АО и с фазами вспышки. Наконец, проведено краткое обсуждение связей КД с КА и возможной роли механизма обменного пересоединения [90] в обсуждаемых процессах с привлечением данных наблюдений.

4.2 Вспышки с длительным гамма-излучением и комплексы активности

В общем числе вспышек на Солнце особое место занимают события, сопровождающиеся длительным излучением в гамма - диапазоне электромагнитного спектра. В работе Share и др. [101] приведен каталог таких вспышек, наблюдавшихся с помощью внеатмосферной обсерватории Fermi/LAT (временное разрешение прибора LAT – одна минута) в течение 24 цикла активности. Этот список содержит 31 событие (первое в марте 2011 года, последнее – в июне 2015 года). Как правило (но не всегда), эти события относятся к популяции вспышек с высоким рентгеновским классом. Перечень таких вспышек приведен в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Характеристики вспышек с длительным гамма-излучением в 24 цикле активности

№	Дата вспышки	№ оборота	№ АО	№ КА	Балл вспышки	Положение вспышки
1	7.03. 2011	2107	11164	N 06	M3.7	Я
2	2.06.2011	2110	11226		C3.7	Н
3	7.06.2011	2110	11226		M2.5	Н
4	4.08.2011	2113	11261	N07	M9.3	Я
5	9.08.2011	2113	11263	N12	X6.9	Я
6	6.09.2011	2114	11283	N11	X2.1	Я
7	7.09.2011	2114	11283	N11	X1.8	Я
8	24.09.2011	2115	11302	N07	X1.9	В
9	23.01.2012	2119	11402	N17	M8.7	Я
10	27.01.2012	2119	11402	N17	X1.7	Я
11	5.03. 2012	2121	11429	N18	X1.1	В
12	7.03.2012	2121	11429	N18	X5.4	В
13	7.03.2012	2121	11429	N18	M7	В
14	9.03.2012	2121	11429	N18	M6.3	В
15	10.03.2012	2121	11429	N18	M8.4	В
16	17.05.2012	2123	11476	N20	M5.1	Я
17	3.06.2012	2124	11496	N20	M3.3	Я
18	6.07.2012	2125	11515	S11	X1.1	Я
19	23.10. 2012	2129	11598	S10	X1.8	В
20	27.11.2012	2130	11618		M1.6	Н
21	11.04.2013	2135	11719	N26	M6.5	Я
22	13.05.2013	2137	11748		X1.7	Н
23	13.05.2013	2137	11748		X2.8	Н
24	14.05.2013	2137	11748		X3.2	Н
25	15.05.2013	2137	11748		X1.7	Н
26	11.10.2013	2142	11869	N31	M4.9	Я
27	25.10.2013	2143	11882	S24	X1.7	В
28	28.10.2013	2143	11882	S24	M4.4	В
29	25.02.2014	2147	11990	N33	X4.9	Я
30	01.09.2014	2154	12158		X2.1	Н
31	21.06.2015	2165	12371	N48	M2.6	Я

В первом столбце таблицы 4.1 приведен номер вспышки, согласно данным [101], во втором указана дата вспышки. В третьем столбце отмечен номер кэррингтоновского оборота, в течение которого произошла вспышка, в четвертом – номер АО, где произошла вспышка. В пятом столбце указан номер КА, к которому относилась АО согласно каталогу [42], в шестом – рентгеновские баллы вспышек. Следует оговориться, что события 26 и 30 в таблице наблюдались за лимбом Солнца, поэтому приведенные для них оценки значений рентгеновских классов могут быть отягощены значительными погрешностями. В седьмом столбце указано, в ядре КА (Я), в ветви КА (В), или за пределами КА (Н) находилась вспышечно-активная АО. Здесь уместно напомнить, что ядром КА называется область на Солнце, где на протяжении не менее трех кэррингтоновских оборотов подряд наблюдается активность в форме пятен, ветвь КА – АО, находящаяся не более чем в 30 градусах от ядра КА и связанная с ядром КА высокими корональными петлями [4].

В таблице 4.1 одна вспышка относится к классу С, 14 – к классу М, 16 – к классу Х, причем все они сопровождались КВМ. Анализ локализации гамма - вспышек на поверхности Солнца показал, что 14 событий произошли в ядрах КА, и 9 вспышек – в ветвях КА. Таким образом, 74% рассматриваемых вспышек оказались физически связанными с КА.

Восемь вспышек произошли в АО вне КА. Существенно, что 7 из 9 вспышек в ветвях КА произошли всего в двух АО: пять в АО № 11429 и две – в АО № 11882. Восемь гамма - вспышек вне КА возникли всего в четырех АО, в том числе две в АО № 11226, и четыре в АО № 11748. Эти особенные в указанном смысле группы пятен требуют специального исследования. С этой оговоркой можно констатировать, что подавляющее большинство гамма-вспышек (практически три четверти) происходили в АО, связанных с КА.

4.3 Вспышки с длительным гамма-излучением и корональные дыры

Рассмотрим еще одно свойство локализации гамма - вспышек на Солнце. В главе 3 показано, что все протонные вспышки, которые генерировали потоки энергичных (с энергиями более 10 МэВ) частиц, зарегистрированных на орбите Земли в 24 цикле активности, произошли вблизи границ корональных дыр (КД). Кратчайшие расстояния от области локализации вспышки до границы ближайшей КД, определенные по синоптическим картам [26], были разбиты на 9 интервалов, причем каждый интервал составлял 60 Мм (несколько менее 5°). Аналогичная процедура была выполнена и в отношении гамма - вспышек из таблицы 4.1. На рис. 4.1 приведено процентное распределение расстояний от вспышки до границы ближайшей КД (здесь имеются в виду области расположения самих вспышек в видимой области спектра, а не зоны порожденного ими гамма- излучения, поскольку они могут отличаться).

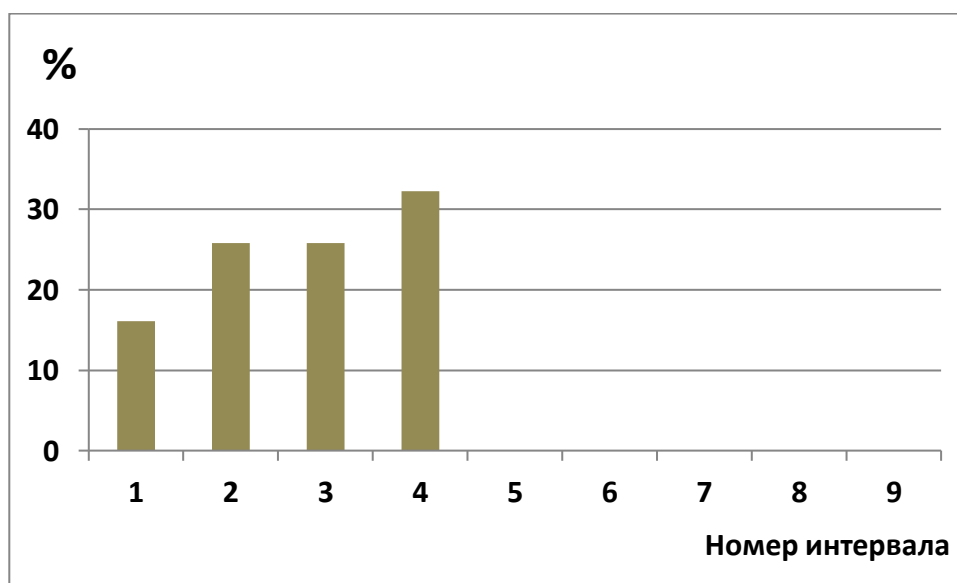


Рис. 4.1. Зависимость расстояния от гамма- вспышки до ближайшей корональной дыры в 24 цикле активности. Количество случаев в гистограмме приведено в процента, расстояния – в интервалах по 60 Мм.

Статистика событий (всего 31 вспышка) крайне невелика, но, тем не менее, можно отметить, что все без исключения вспышки, генерировавшие длительное гамма – излучение, произошли в непосредственной близости от границ КД (не более 240 Мм). Примеры показаны на рис. 4.2 и 4.3.

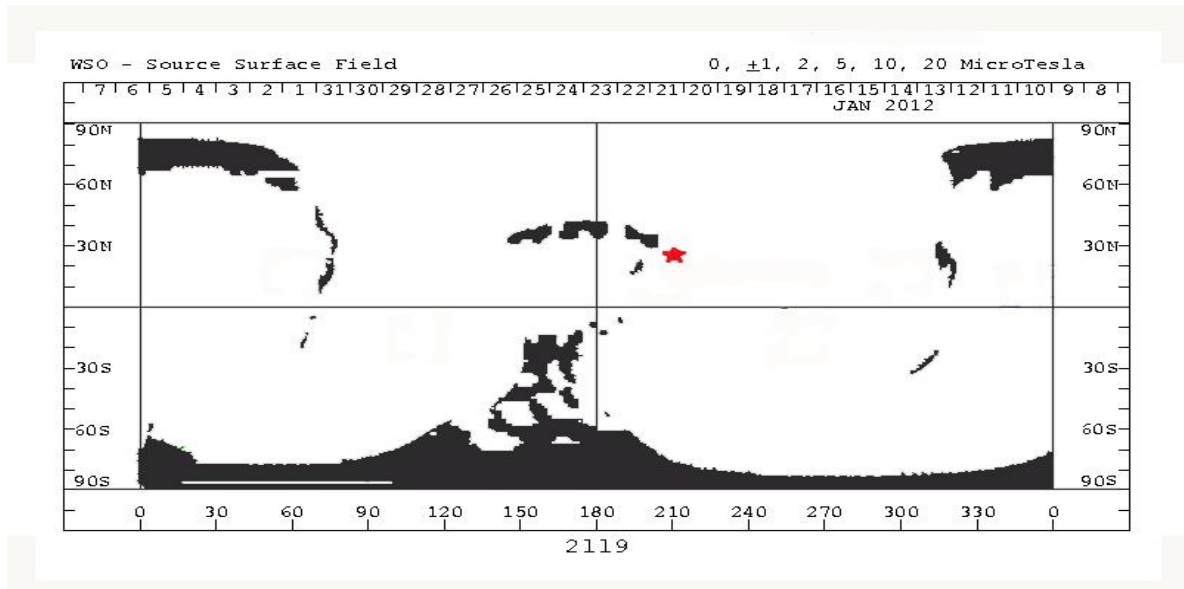


Рис. 4.2. Синоптическая карта расположения КД в 2119 кэррингтоновском обороте по данным WSO [26]. По оси абсцисс внизу – кэррингтоновская долгота, сверху – даты, соответствующие положению центрального меридиана, по оси ординат – кэррингтоновская широта. Звездочкой показана локализация гамма - вспышки балла M8.7, происшедшей 23.01.2012 в АО 11402 в ядре КА 24N17 (нумерация по каталогу [42]).

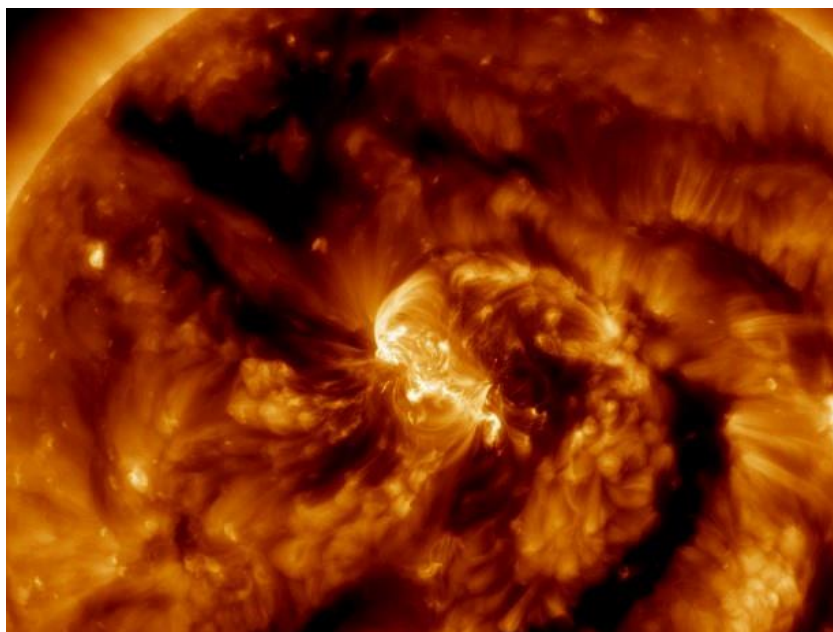


Рис. 4.3 Фрагмент солнечной поверхности в свете линии 19,3 нм, полученный 21.06.2015 космической обсерваторией SDO. Темные области (КД) вплотную подходят к АО 12371 в ядре КА 24N48 (нумерация по каталогу [42]).

На рис. 4.2 можно видеть явно неслучайное расположение сильной вспышки 23.01.2012 вблизи изолированной (не связанной с полярной) КД. На изображении, полученном с обсерватории SDO (рис. 4.3), видно, что КД практически со всех сторон охватывают АО 12371, наблюдавшуюся в 2165 кэррингтоновском обороте в ядре КА 24N48 (нумерация по каталогу [42]). Здесь 21.06.2015 произошла последняя в 24 цикле гамма-вспышка с рентгеновским баллом М 2.6.

4.4. Развитие сильной вспышки в комплексе активности на Солнце

Качественно рассмотрим процесс эволюции мощной солнечной вспышки в КА. Для вспышечноактивных КА характерны следующие особенности. Во-первых, подавляющее большинство вспышечноактивных групп пятен располагается в ядрах КА. Во-вторых, поскольку ядра КА являются участками солнечной поверхности, где последовательно всплывают новые порции магнитного потока (новые АО), в большинстве случаев здесь формируются

системы арок магнитного поля на разных уровнях, причем «старые» арки отличаются значительной базой (расстояние между основаниями арок). Эти размеры в ряде случаев достигают 300 и даже 400 Мм [51]. Отмечены случаи, когда одно из оснований плотной низкой арки (волокно АО, расположенное над линией раздела полярностей (далее – ЛРП)) находится в области сильных магнитных полей вблизи пятен ядра КА, а второе основание – в области флоккулов на периферии АО или даже вблизи усиленных узлов хромосферной сетки далеко за пределами АО [82]. Именно такое волокно становится основой магнитного жгута, формирующего КВМ в ходе развития процесса вспышки. Заметим, что КА, породившие вспышки с длительным гамма – излучением, отличались протяженными ярко выраженными ЛРП с сильными градиентами магнитных полей в их окрестностях.

Перейдем к качественному описанию временной последовательности изменений магнитной топологии в структуре КА в ходе сильной вспышки и связанных с ними процессов ускорения частиц с использованием известной модели «прорыва» [69; 58]. В соответствии с этой моделью, сдвиговые, вихревые и другие движения вещества в фотосфере, запутывающие силовые линии магнитных полей в области ЛРП, приводят вышележащую магнитную структуру КА в неравновесное состояние. При этом возникают особые точки X-типа и развиваются токовые слои (ТС). В ТС включаются диссипативные процессы, приводящие к нагреву и ускорению частиц плазмы.

Как правило, вспышка начинается с появлений небольших поярчений в линии $H\alpha$ по обе стороны от ЛРП. Волокно, расположенное над ЛРП, при этом подвергается возмущениям. Затем начинается импульсная фаза вспышки с появлением ускоренных в ТС энергичных электронов. Почти одновременно с этим начинается подъем волокна вследствие развития в КА крупномасштабной МГД неустойчивости.

В поднимающейся магнитной структуре волокно образует ядро КВМ. Подъем КВМ сопровождается перестройкой замкнутой структуры магнитных полей над АО в открытую конфигурацию в результате действия процесса

магнитного пересоединения. Отметим, что процесс магнитного пересоединения может быть многократным при последовательном прорыве системы вышележащих магнитных петель [88]. В результате этого процесса образуется магнитная структура в форме каспа с токовым слоем, расположенным позади уходящего КВМ (рис. 4.4) [88].

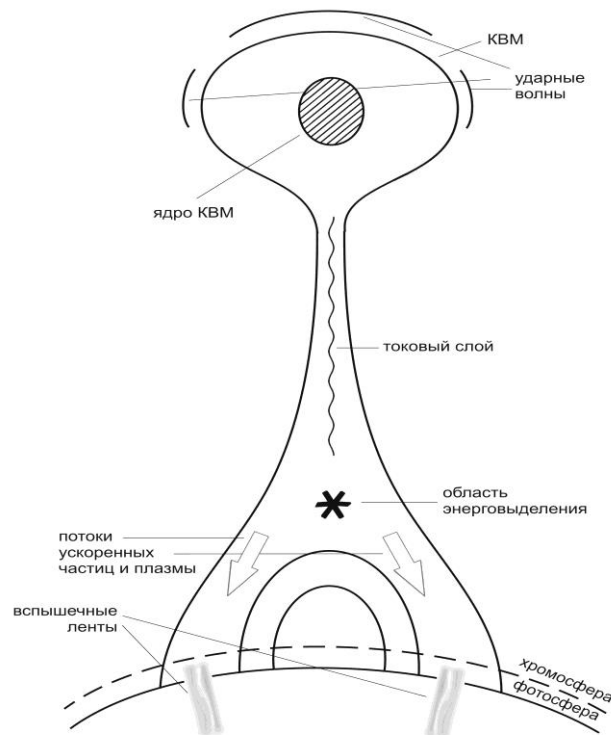


Рис. 4.4. Качественное представление магнитной структуры эруптивной вспышки с КВМ. Звездочкой (*) отмечена область интенсивного выделения энергии, обычно регистрируемая в жестком рентгеновском диапазоне (НХР) (ИСЗ GOES); в основаниях петель вспышки также наблюдается НХР. Стрелками показаны потоки быстрых частиц и горячей плазмы. Вокруг КВМ отмечены фронты ударных волн.

Известно, что на импульсной фазе вспышки в области выделения энергии (на рис. 4.4 эта область отмечена звездочкой *) наблюдаются быстро движущиеся потоки горячей плазмы и пучки энергичных ускоренных частиц, часть которых по магнитным силовым трубкам распространяется в

нижележащие слои солнечной атмосферы. Импульсная фаза вспышек с длительным гамма-излучением определялась по поведению профилей рентгеновского излучения в спектральной области (1-8 Å) по данным с SDO [31]. Продолжительность определенной указанным образом импульсной фазы вспышки составляла в среднем 20 минут. В ходе взаимодействия энергичных частиц с более плотной хромосферной плазмой в основаниях магнитных петель вещество нагревается. Именно в этих областях генерируется жесткое тормозное рентгеновское, ультрафиолетовое, а во время наиболее мощных вспышек, и гамма-излучение (область * на рис. 4.4). Быстрый нагрев плазмы в хромосфере приводит к ее «испарению» и подъему с заполнением всего объема корональных магнитных арок. В этот период вспышки наблюдается максимальная эмиссия в мягком рентгеновском диапазоне.

На последующей (главной) фазе вспышки горячая плазма в системе арок длительное время излучает в мягком рентгеновском диапазоне, постепенно теряя энергию. По-видимому, подобная длительная фаза вспышечной эмиссии поддерживается процессами энерговыделения в результате процесса магнитного пересоединения в вертикально расположенном ТС, сформировавшимся позади КВМ.

На рис. 4.4 показана типичная топология магнитных полей во время эруптивной вспышки с КВМ на поздней стадии ее развития. В ходе импульсной фазы вспышки образуется структура в форме каспа и формируется протяженный слой ТС, следующий за КВМ. Отметим, что волокно, формирующее КВМ, начинает подниматься спустя несколько минут после импульсной фазы вспышки [69], а иногда и раньше.

В частности, по данным наблюдений с КА Fermi/LAT [101] было отмечено, что наиболее сильные потоки гамма - излучения наблюдаются в тех случаях, когда возникновение и развитие КВМ происходит до начала импульсной фазы вспышки или же непосредственно в ходе этой фазы (Минасянц и др., [31]). Отмечено также, что появление наиболее сильных потоков гамма - эмиссии и высокоскоростных КВМ происходило в пределах довольно ограниченных

интервалов времени – от 2 до 16 минут. Для наиболее быстрых КВМ (в шести событиях) была выявлена линейная связь между максимальными потоками гамма-излучения F_{\max} ($\gamma > 100$ МэВ) и скоростями КВМ [31]. Это может быть одним из признаков развития большой вспышки.

Уплотнение плазмы, образующееся вслед за движущимся образованием в газообразной среде, является хорошо известным физическим явлением. При движении плотного сгустка плазмы с магнитным полем (КВМ) со сверхзвуковой скоростью через плазму солнечной атмосферы в «спутном следе» за ним формируется компактная область сравнительно плотной плазмы, где близко располагаются зоны с магнитными полями противоположной направленности, – образуется ТС. При движении КВМ в солнечной короне линии поля стягиваются к слою ТС и увлекают за собой корональную плазму, вследствие чего позади КВМ образуются обширные зоны разрежения плазмы. «Пузырь» же в головной части КВМ при быстром движении сквозь плазму солнечной короны по мере падения плотности окружающего вещества быстро расширяется в стороны и формирует, помимо головной, боковые ударные волны на флангах, которые также могут ускорять частицы (как показано на рис. 4.4), но, вероятно, менее эффективно. Кроме того, как уже отмечалось в работе [73], КВМ образует «открытый канал» в короне, через который ускоренные во вспышке частицы могут проникать в верхние слои короны в КВМ и в гелиосферу. Представляется возможным, что в ходе восстановления структуры поля позади уходящего КВМ могут образоваться и обратные ударные волны, но это требует отдельного рассмотрения.

Описанная качественная картина получила некоторое подтверждение при наблюдениях развития вспышки класса X2.8 13 мая 2013 года (начало в 15:50 UT) с помощью аппаратуры AIA/SDO в КУФ - диапазоне, а также в ходе наблюдений ИСЗ RHESSI в жестком рентгеновском диапазоне. Вспышка сопровождалась быстрым (1800 км/сек) КВМ типа гало, распространяющимся во внешней короне Солнца [70]. В ходе эволюции КВМ в ТС позади него развивались плазменные неустойчивости с рождением в токовом слое

магнитных островов и включались диссипативные процессы, сопровождавшиеся нагревом плазмы и ускорением ионов и электронов [70; 87].

Таким образом, протяженный вертикальный слой ТС способен обеспечивать «энергетическую связь» между КВМ и вспышечной областью. Некоторая часть ускоренных в слое ТС энергичных электронов и ионов распространяется вниз, проникая в зону каспа магнитной структуры (* на рис. 4.4), и генерирует жесткое рентгеновское излучение вспышки. Другая часть ускоренных частиц уходит непосредственно в область КВМ, обеспечивая дополнительный приток энергии в область выброса. Можно предположить, что именно процессы нагрева и ускорения плазмы в ТС за КВМ ответственны за развитие длительной фазы процесса вспышки с постепенным затуханием выделения энергии. Следует добавить, что в работе Акимова и др. отмечено, что в вертикальном ТС может происходить ускорение протонов электрическим полем вплоть до энергий \sim ГэВ.

Параметры плазмы в протяженном слое ТС за выбросом КВМ неоднократно определялись по данным наблюдений [84;110]. В разных вспышечных событиях с КВМ было выявлено, что температура, мера эмиссии и плотность уменьшаются вдоль ТС с ростом высоты [110].

В КУФ диапазоне с космических обсерваторий Hinode и AIA/SDO показали, что температура плазмы в ТС может достигать 20 МК и выше, а максимальная температура регистрируется в основании ТС, в вершинах петель после вспышки [110] (* на рис. 4.4). Во время эруптивной вспышки класса X8.2 10 сентября 2017 года на западном лимбе Солнце была получена оценка толщины слоя ТС между областью каспа и КВМ, оказавшаяся равной 3×10^3 км. Кроме того, на конечной стадии выброса волокна было замечено разделение ТС на несколько небольших слоев [111].

Таким образом, в рамках рассматриваемой модели длительная гамма-эмиссия объясняется ускорением протонов и электронов в межпланетных ударных волнах на фазе выхода КВМ в верхние слои короны и, затем, в межпланетную среду [71;100]. Количественным свидетельством в пользу этого

вывода является обнаруженная линейная связь между продолжительностью гамма – событий и конечной частотой радиовсплесков II типа в межпланетной среде [71]. Ударные волны КВМ, помимо ускорения электронов, генерирующих всплески радиоизлучения II типа, ускоряют и протоны до энергий > 300 МэВ. Часть энергичных протонов возвращается вниз по линиям магнитного поля к поверхности Солнца и генерирует гамма-излучение посредством распада пионов, причем область гамма – излучения может простираться на десятки градусов от КА, где произошел выброс КВМ [62]. Согласно оценкам [62], количество энергичных протонов, ускоряемых непосредственно в самой области вспышки (без учета КВМ), может составлять около 10% от общего числа протонов, создающих длительное гамма-событие. Продолжительность гамма – вспышек, превышающая несколько часов, может быть объяснена наличием резервуара ускоренных протонов позади КВМ, который взаимодействует с обширными областями верхней солнечной атмосферы вследствие существующей между ними магнитной связи.

Возможно также, что энергичные протоны рассеиваются волнами альфвеновской турбулентности, что приводит к увеличению их времени жизни в магнитных ловушках в межпланетной среде.

В работе [62] интервал излучения гамма – квантов высоких энергий (> 100 МэВ) было предложено называть «второй устойчивой стадией» вспышечной эмиссии. Соответственно, «первая стадия» события – это излучение в ходе импульсной фазы вспышки. Подчеркнем, что в подобных событиях, сопровождающихся гамма–излучением, длительность импульсной фазы составляла менее 20 минут, в то время как основная фаза гамма - эмиссии может продолжаться несколько часов.

4.5. Связь гамма-вспышек с корональными дырами

В разделе 4.3 уже обсуждалась (в основном, статистически) локализация гамма – вспышек вблизи КД. Еще раз подчеркнем, что в ста процентах

рассмотренных случаев вспышки, сопровождавшиеся длительными гамма – событиями, происходили вблизи границ КД. Здесь мы рассмотрим возможный механизм взаимодействия между КД и гамма – вспышками в КА с привлечением недавних наблюдений распределения магнитных полей в КД.

КД регистрируются в солнечной короне как области пониженной эмиссии в мягком рентгеновском диапазоне и в линиях КУФ – диапазона. Конфигурация магнитных полей в пределах КД носит преимущественно открытый характер. В открытом магнитном поле КД обычно преобладает одна полярность, что вызвано непрерывным дисбалансом выхода локального магнитного потока. КД являются источниками высокоскоростных потоков солнечного ветра, которые могут оказывать активное воздействие на магнитосферу Земли. В то же время эти образования не лишены признаков мелкомасштабной активности: в КД регистрируются яркие рентгеновские точки, иногда наблюдаются выбросы в рентгеновском диапазоне и изредка даже вспышки.

Связь между КД и КА подробно показана в [51], где был сделан вывод о тесной генетической связи между КА и КД. Так, например, в этой работе было показано, что на фазе распада пятен эволюционирующие магнитные поля КА могут трансформироваться либо в изолированную КД, либо в «залив» полярной КД. Таким образом, КД и КА оказываются эволюционно связанными друг с другом. В пользу этой концепции свидетельствуют прямые наблюдения трансформации остаточных полей распадающегося КА в униполярное поле КД [8; 62; 61].

Вопрос о связи солнечных вспышек, которые сопровождаются выходом ускоренных энергичных частиц (в частности, протонов) в гелиосферу, с КД, обсуждался в главе 3. Было выяснено, что КД, близко расположенные к АО, создают условия для образования «каналов» выхода ускоренных частиц в гелиосферу для любых типов вспышек – как импульсных, так и длительных.

Известно, что наиболее энергичные солнечные вспышки обычно связаны с КВМ. Тем не менее, существуют так называемые замкнутые магнитные конфигурации со вспышками, которые не сопровождаются КВМ. Вероятно, в

этих случаях в магнитной конфигурации оказывается недостаточно запасенной энергии для того, чтобы возмущенное волокно могло прорвать вышележащее поле и образовать открытую структуру, модель «прорыва» в этом случае не реализуется. Для прояснения этого вопроса в работе [66] была использована выборка из 56 вспышек X - класса в 23 и 24 солнечных циклах. Результаты анализа показали, что вспышки X - класса, локализованные вблизи областей открытого магнитного поля, чаще оказывались эруптивными по сравнению с вспышками, где таких областей не наблюдалось. По-видимому, магнитные конфигурации, находящиеся вблизи КД, из-за взаимодействия с ними могут оказаться менее устойчивыми.

Как уже отмечалось, статистика позволяет утверждать, что близость КД к области возникновения вспышек в КА может рассматриваться как важный фактор, обеспечивающий возможность выхода ускоренных частиц в гелиосферу [75]. Так, например, в работах, посвященных изучению локализации источников солнечных космических лучей (СКЛ) [94; 85], был сделан вывод, что вспышки, ответственные за явления СКЛ, как правило, возникают вблизи поверхности раздела между КА и соседними КД. По-видимому, такие вспышки возникают в результате «обменного» магнитного пересоединения между соседними областями с замкнутым и открытым магнитным полем (физика процесса обменного пересоединения была подробно описана в работе Моффата [14]). Фактор «обменного» пересоединения уже обсуждался нами в предыдущей работе [75]. Там же отмечалась важная роль этого фактора в формировании открытых магнитных «каналов» в короне. В переходной области между открытым и закрытым магнитным потоком формируются выходящие в корону Солнца трубки магнитного поля и генерируются потоки альвеновских волн [34]. Потоки альвеновских волн способны привести к генерации вспышки в соседней области АО [75], если такая область окажется в состоянии, близком к потере равновесия. Отметим, что проявления обменного пересоединения зарегистрированы в солнечном ветре, при переполюсовке магнитных полей в цикле активности, а также на границах АО.

Имеются данные, по крайней мере, о двух случаях наблюдений, иллюстрирующих проявления процесса магнитного пересоединения при взаимодействии КД с АО. На границе КД наблюдался выход новой небольшой АО. В первом случае описано взаимодействие АО 10869 с близкой КД по данным SOHO/EIT и MDI. Были зарегистрированы петли магнитного поля между АО и КД, которые привели к «отступлению» границы КД. В то же время на противоположной стороне АО появился корональный димминг, который был объяснен открытием линий поля в этой зоне [60]. Во втором случае наблюдалась похожая картина: при рождении АО на границе КД (по данным SDO/HMI) образовалась система замкнутых линий поля, которая также привела к смещению границы КД [83]. Таким образом, вследствие описанного взаимодействия АО с соседней КД может измениться общая энергия магнитной конфигурации АО.

Подчеркнем, что все рассмотренные вспышки с продолжительным гамма-излучением из каталога [101] также произошли в непосредственной близости от КД, так что этот вывод имеет достаточно общий характер.

Таким образом, в главе 4 приведены аргументы в пользу того, что гамма – вспышки на Солнце, которые сопровождалась КВМ, тесно связаны с КА (74 % таких событий произошли в КА, а не в отдельных АО), а также с КД (все гамма – вспышки в течение 24 цикла солнечной активности происходили в непосредственной близости от границ КД). Кроме того, все рассмотренные вспышки, в которых наблюдалось гамма – излучение, сопровождалась явлениями КВМ.

Приведенная статистика показывает, что именно локализация КА вблизи КД является значимым фактором, воздействующим на вероятность возникновения гамма – вспышки. С учетом того обстоятельства, что КД в большинстве случаев генетически связаны с КА [47], фактор близости КД становится вполне естественным.

Для описания физического механизма гамма – вспышки была использована известная качественная модель, основанная на концепции

«прорыва» магнитной структуры [69;58]. В качестве необходимых для генерации гамма – излучения во вспышке следует ожидать выполнения следующих условий:

- наличие сильных магнитных полей, типичных для КА;
- наличие протяженного волокна АО в КА (магнитный жгут, 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).

В модели особо отмечена важная роль ТС (спутного следа за КВМ) в «подпитке» энергичными частицами, как собственно «тела» КВМ, так и области вспышки в нижележащих слоях атмосферы.

Можно констатировать, что условия, при которых возможно появление солнечных гамма - вспышек, во многом близки к условиям возникновения протонных вспышек [75]. По-видимому, здесь нет качественных различий, и гамма – вспышки генерируются при экстремальных значениях тех же физических параметров, которые приводят к протонным событиям.

4.6. Выводы к главе 4

Выводы, сделанные по итогам исследования. изложенного в главе 4, работы могут быть сформулированы следующим образом:

- местами локализации вспышек с гамма-излучением являются КА (с КА связаны 74% таких событий). Для таких КА характерна протяженная ЛРП с высокими градиентами магнитного поля;
- наиболее сильные потоки гамма-излучения наблюдаются в тех случаях, когда КВМ происходит во время импульсной фазы вспышки и имеет высокую

скорость;

– для всех случаев гамма – вспышек характерно присутствие близких КД. Вероятно, этот фактор является обязательным для возникновения гамма-излучения во вспышке.

Глава 5. Вспышки в активных областях за пределами комплексов активности

5.1 Введение

На протяжении многих лет исследователи постепенно выделяли статистические и морфологические свойства групп пятен, пытаясь выявить их связь с потенциальным уровнем вспышечной активностью. Давно отмечена связь цюрихского класса групп пятен со способностью АО генерировать вспышки. Гелиофизикам хорошо известно, что вспышки связаны с процессами, сопровождающими выход из-под фотосферы новых порций магнитного потока [50]. 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;48]. Отмечено, что в качестве признака потенциально повышенной вспышечной активности может рассматриваться вращение крупных пятен [48; База данных № 2014621721]. Перед вспышками и во время вспышек зарегистрированы также сдвиговые движения вещества вдоль линии раздела полярностей (далее ЛРП) магнитных полей [44]. Набор этих и ряда других признаков легли в основу разработки действующих алгоритмов прогнозирования повышенной вспышечной опасности.

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

Как указано выше, в настоящей диссертационной работе автор проверяет гипотезу, связывающую уровень вспышечной активности групп пятен с их принадлежностью или же не принадлежностью к комплексам активности (далее – КА). 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.

В главах 3 и 4 показано, что именно принадлежность группы пятен к ядру либо ветви КА является важным статистическим признаком ее потенциально повышенной вспышечной активности. Гипотеза, объясняющая причину более высокой вспышечной активности в тех АО, которые развиваются в ядрах или в ветвях КА, была выдвинута в работе [96], развита в последующих работах [101;52;92] 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 М-Х. С точки зрения рассматриваемой гипотезы, это выглядит странно. Результаты изучения таких областей, названных аномальными в указанном смысле, изложены в данной главе.

5.2 Активные области вне КА

Как указано выше, 30% всех АО в 24 цикле за указанный период имели отношение к КА. Автором 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, описанному выше. 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 таблице 5.1. В 24 цикле их оказалось всего 13.

Таблица 5.1. Некоторые параметры аномальных активных областей

№ п/п	№ АО	Номер кэrr. оборота	Кэrr. долгот а	Широт а	S max, мдп.	Суммарный. вспыше чный индекс	Te, суто к	Ve, мдп. / сут.	T, суток
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
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

В первом столбце таблицы 5.1 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 полусферы (мдп), данные взяты в [26] 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 таблице 5.2. Данные о площади и продолжительности наблюдений всех АО в 24 цикле активности на солнечном диске взяты в [26] средние параметры рассчитаны автором.

Таблица 5.2 Характеристики активных областей

Тип АО	Число АО	V_e мдп/сут	T_e , суток	S_{max} , мдп	T , суток	V_d мдп/сут
АО вне КА	1157	$34,4 \pm 1$	$2,9 \pm 0,07$	$116 \pm 5,5$	$6,7 \pm 0,1$	$35,3 \pm 2$ (1041)
АО в ядрах КА	382	$49,3 \pm 2,7$	$3,4 \pm 0,1$	$160,7 \pm 10$	$8,1 \pm 0,2$	$40,6 \pm 2,9$ (346)
АО в ветвях КА	148	$37,4 \pm 4,2$	$2,8 \pm 0,2$	$105,5 \pm 14,1$	$6,5 \pm 0,3$	$31,6 \pm 4,7$ (132)
Аномальные АО	13	$106,6 \pm 19,2$	$5,2 \pm 0,8$	$475,4 \pm 85$	$11,8 \pm 0,7$	$148,3 \pm 73,2$ (13)

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 таблице 5.2, 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 площади 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, то 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. 5.1,а 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.5.1,а.

Несмотря на малую статистику, видно, что соответствующее распределение ААО (рис. 5.1.б) 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 [32]. 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.

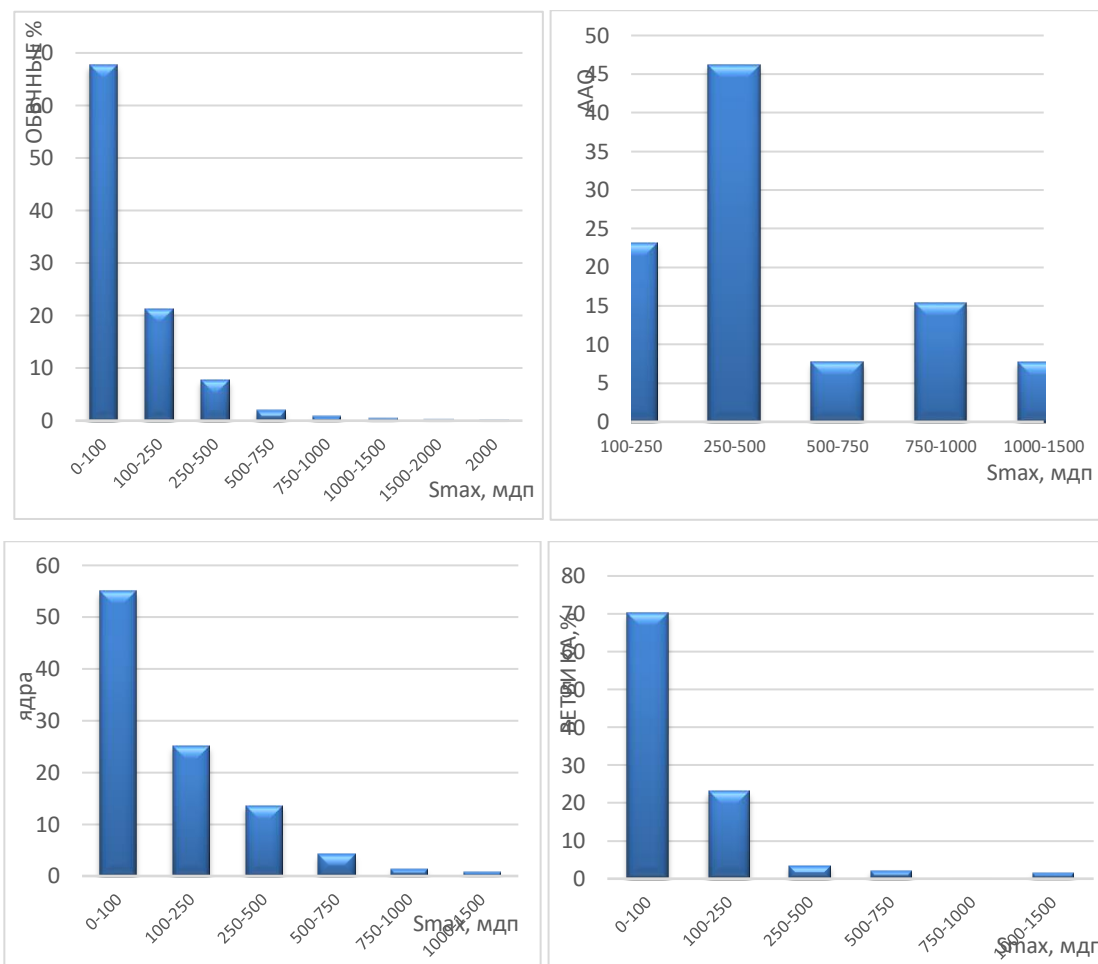


Рис.5.1 а — распределение АО вне КА по значениям максимальной площади, б — аналогичное распределение для ААО, в — для АО в ядрах КА, г — для АО в ветвях КА

На рис.5.2 показаны распределения АО, не имеющих отношения к КА, по продолжительности жизни Т. 65% «обычных» группы пятен вне КА существуют до 8 суток. Доля долгоживущих АО, которые живут дольше 14 суток, не превышает 1% (рис. 5.2.а).

Для ААО распределение носит принципиально другой характер — в этой популяции присутствует совсем мало короткоживущих групп пятен, зато групп, существующих более 11 суток, оказывается более 76 % (рис. 5.2б). Таким образом, в число ААО попадают сравнительно крупные и долгоживущие группы пятен.

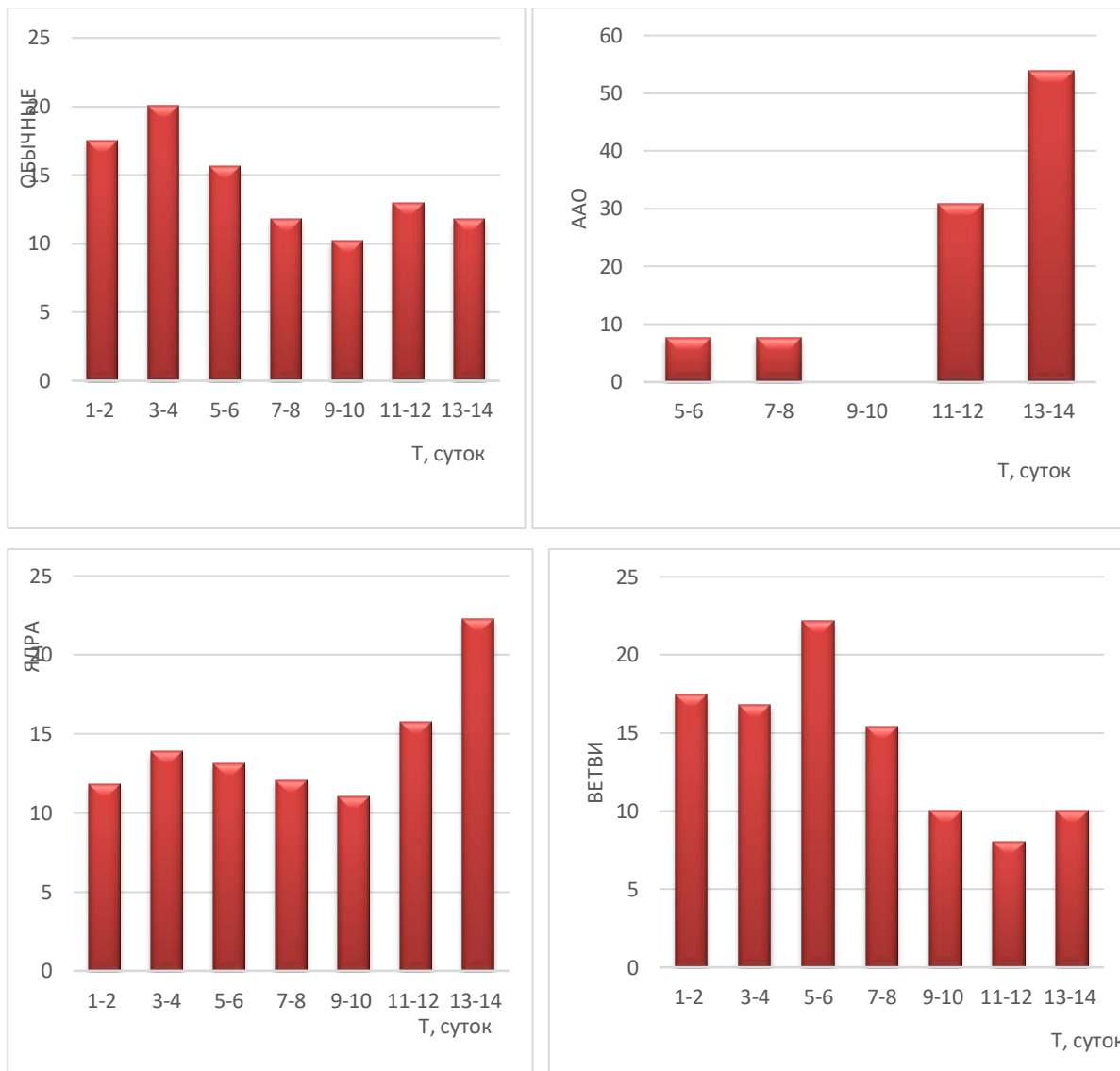


Рис. 5.2. а — распределение АО, наблюдавшихся вне КА, по продолжительности существования, б — аналогичное распределение для ААО, в — для АО в ядрах КА, г — для АО в ветвях КА.

Еще одно общее свойство рассматриваемых АО – это 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 таблице 5.3.

Таблица 5.3 Аномальные активные области и корональные дыры

№ п/п	№ АО	Номер кэrr. 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

В первом и втором столбцах таблицы 5.3 указаны номера ААО, в третьем столбце – номер кэррингтоновского оборота, в четвертом – взаимное положение ААО и ближайшей КД, в пятом столбце – данные о наличии КД в предыдущем обороте, предшествовавшем появлению ААО. Аббревиатура ЭКД обозначает «экваториальные КД» – КД, не связанные в 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, и б) КД продолжала существовать одновременно с ААО.

На рис.5.3 в качестве примера показана ситуация, связанная в ААО № 1046. Видно, что в 2092 обороте существовали несколько фрагментов КД, на месте одного из них в следующем обороте сформировалась АО 1046.

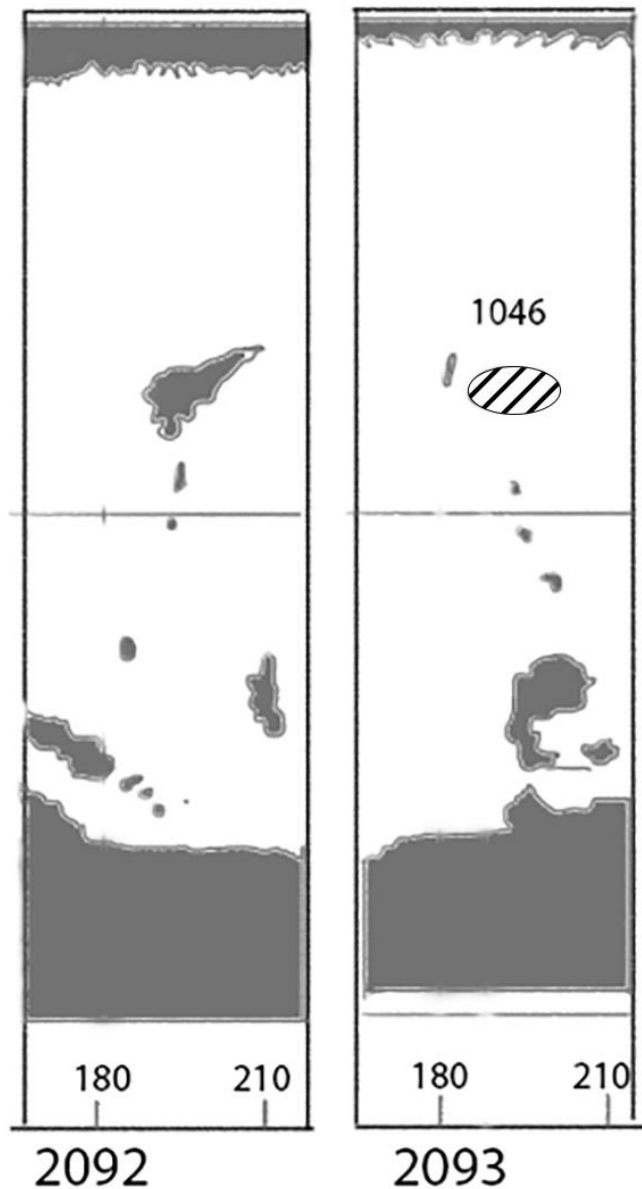


Рис. 5.3 а – фрагмент синоптической карты солнечной поверхности в 2092 обороте, б – тот же фрагмент в 2093 обороте. Черным цветом затушеваны КД, эллипсом показано положение АО № 11046.

На рис. 5.4 показан еще один пример развития аномальных АО вблизи КД. АО 1166 сформировалась в 2107 обороте (рис. 5.4,б) в самом конце протяженной КД, наблюдавшейся в 2106 обороте (рис. 5.4,а). Указанные (и прочие) примеры

производят впечатление неслучайной связи между расположением аномальных АО и КД.

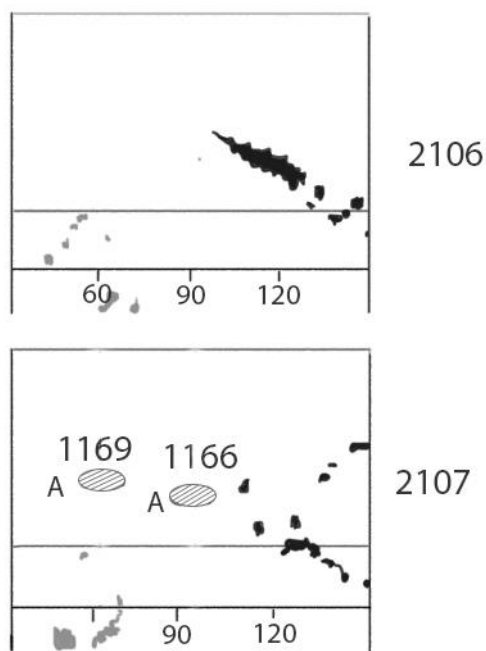


Рис. 5.4. а – фрагмент синоптической карты солнечной поверхности в 2106 обороте, б – в 2107 обороте. Черным цветом затушеваны КД, эллипсами показано положение ААО №№ 1166 и 1169.

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.

5.3 Индивидуальные параметры аномальных активных областей

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 комплексы активных областей, рассматривалось как фактор, гипотетически влияющий на повышенную вспышечную активность ААО.

АО № 1041 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 градусах к западу от АО находится ядро КА 24N01 (АО 1045). На снимках SOHO на длине волне 17,1 нм видны трансэкваториальные петли, соединяющие рассматриваемую АО № 1046 в северном полушарии с АО № 1049, расположенной в южном полушарии на расстоянии 40–50 градусов 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 градуса). Ближайшая АО № 1064 в ядре КА 24N02 находится в 40 градуса к юго-западу. На снимках SOHO петель, соединяющих две АО, не видно.

АО №№ 1166 и 1169. Две АО, расположенные в 30 градусах 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.5.5).

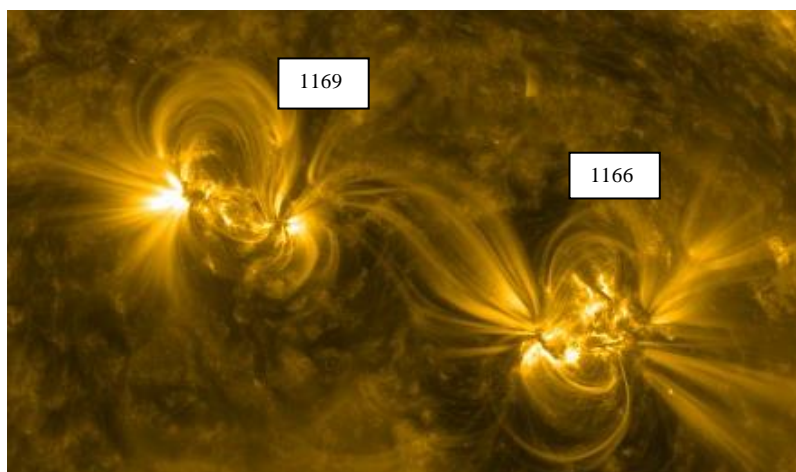


Рис. 5.5 Вспышечные активные области №№ 1169 и 1166 соединены корональными петлями. Снимок 10.03.2011, обсерватория SDO, 17,1 нм.

АО № 1618. В лучах 17,1 нм на снимках SDO отчетливо просматриваются транс-экваториальные 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 5.5). 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 № 1620), где произошла одна из немногих в цикле гамма-вспышка [92; 47]. В 10 градусах 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 компонент, включавшая АО № 1618, произвела в 2129-2130 оборотах две гамма-вспышки из 31, наблюдавшихся в цикле.

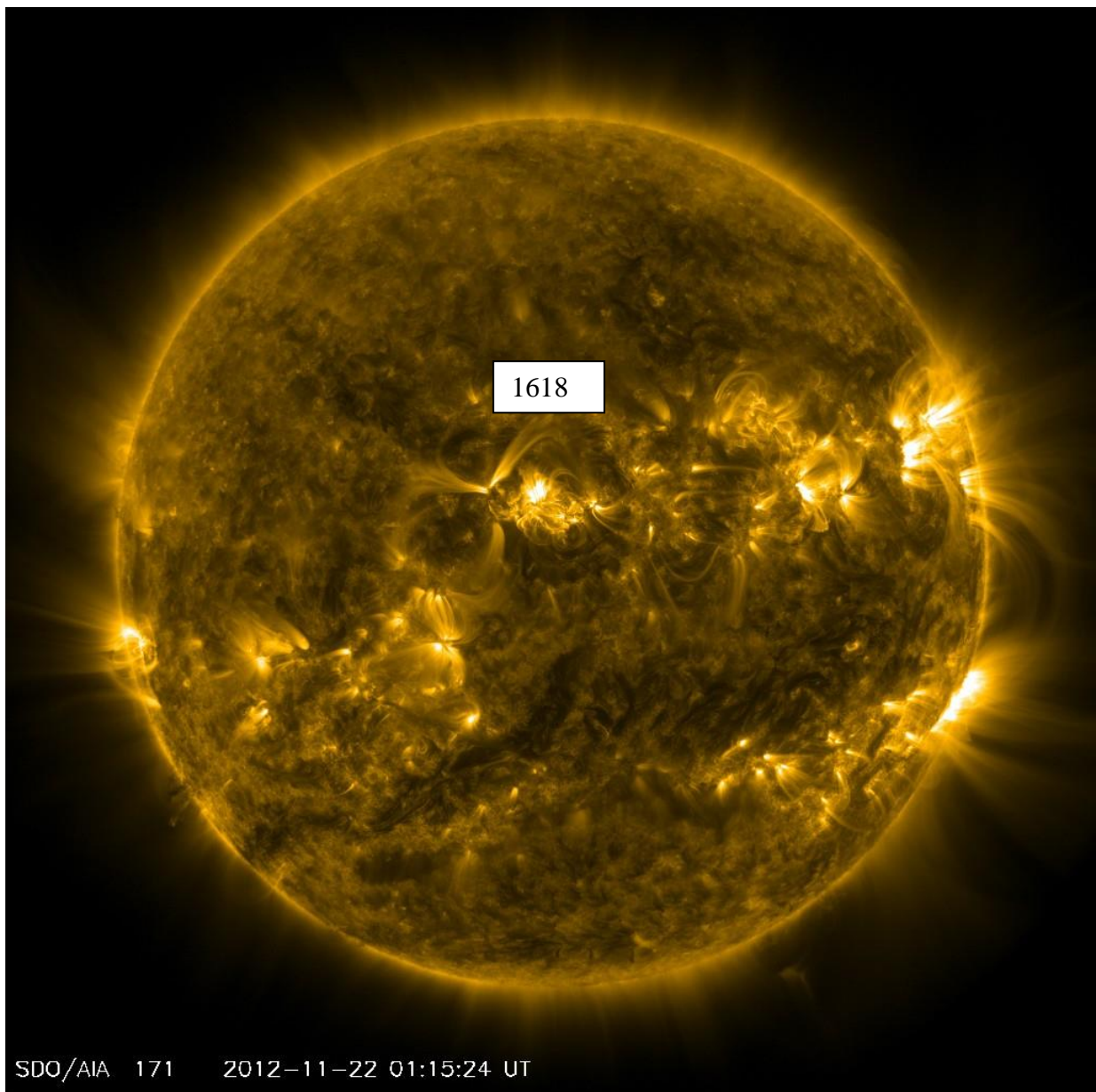


Рис. 5.6. Вспышечная активная область № 1618 соединена корональными петлями с областью в южном полушарии. Снимок 22.11.2012, обсерватория SDO, 17,1 нм.

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.5.7. АО № 1656 находится точно на месте упомянутой выше АО № 1596 (оборот 2129).

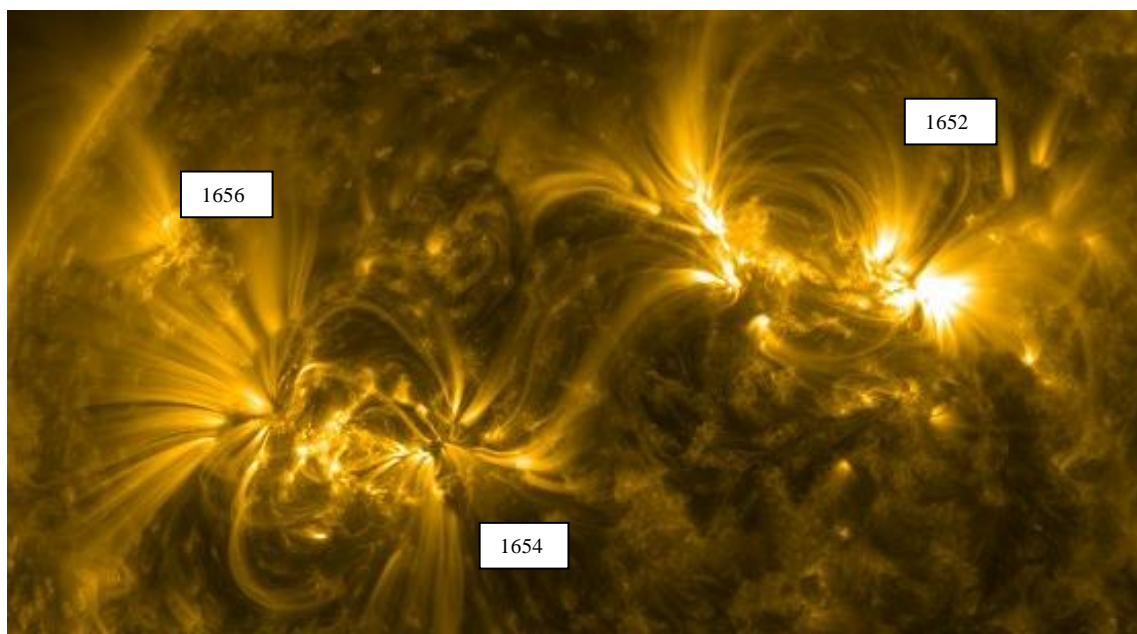


Рис. 5.7 Вспышечная активная область № 1654 соединена корональными петлями с АО 1652 и 1656. Снимок 12.01.2013, обсерватория SDO, 17,1 нм.

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. 5.8).

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

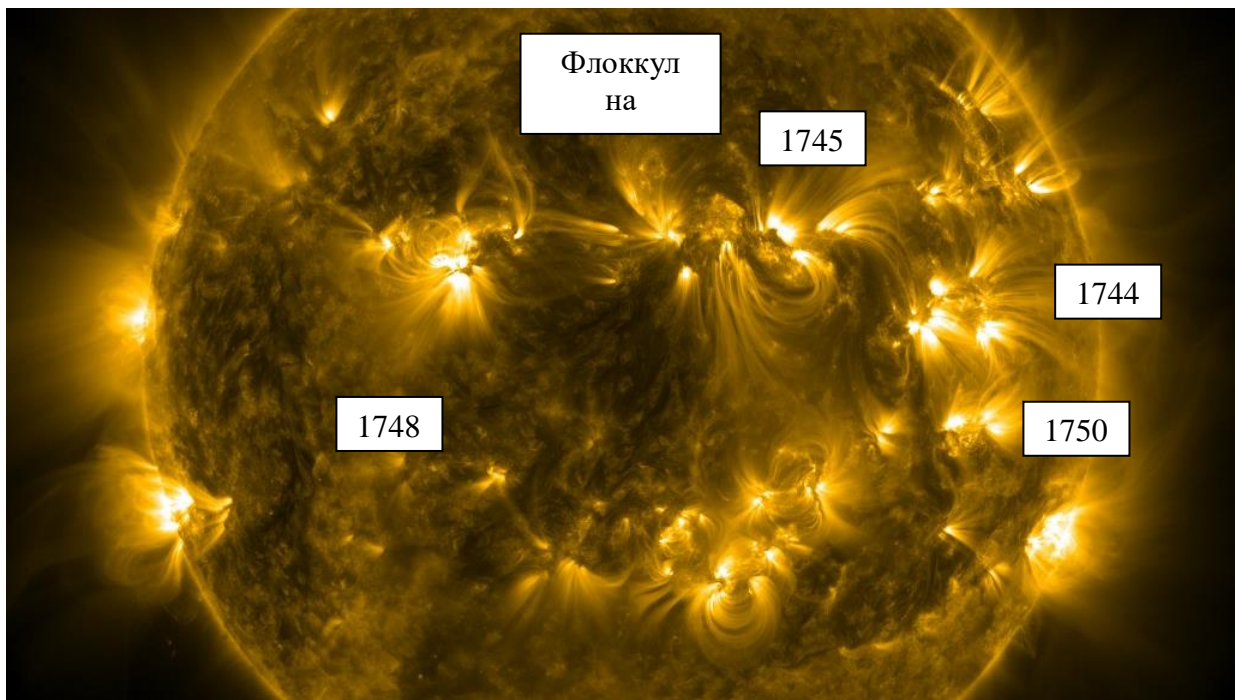


Рис. 5.8 Вспышечная активная область № 1745 соединена корональными петлями с АО 1744. К востоку от АО №1745 находится флоккул, оставшейся от АО № 1726. Снимок 18.05.2013, обсерватория SDO, 17,1 нм.

АО № 1748 связана низкими квазигоризонтальными петлями с остаточными структурами АО № 1726 (рис.5.8), 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. 5.9 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.

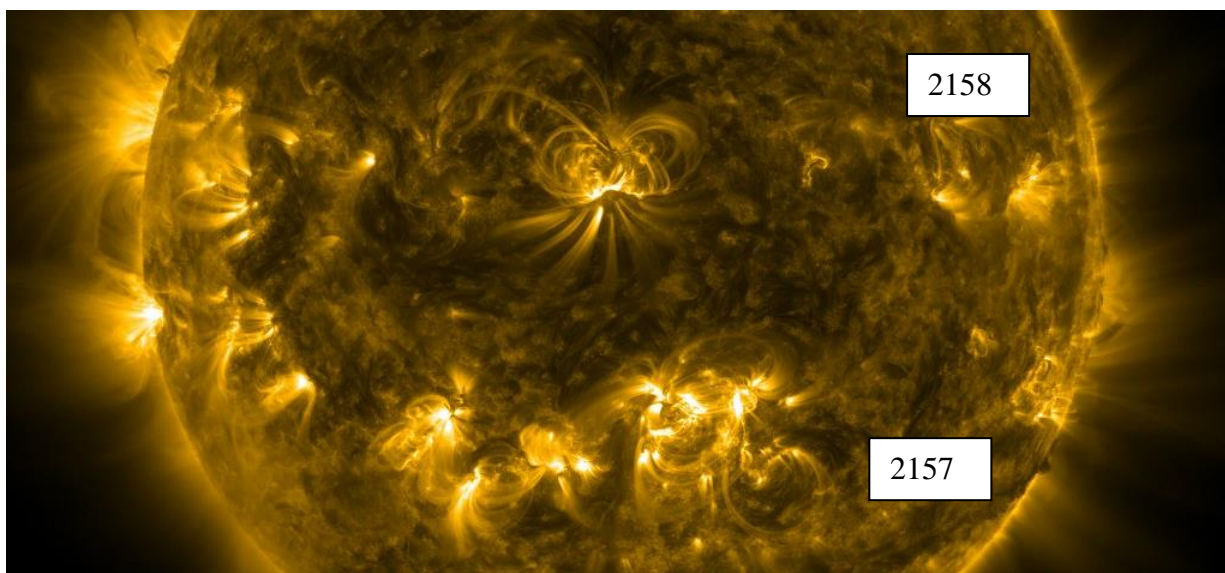


Рис. 5.9. Вспышечная активная область № 2158. Снимок 11.09.2014, обсерватория SDO, 17,1 нм.

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

В 24 цикле солнечной активности практически все АО, которые генерировали вспышки классов М и Х, 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 комплексов активных областей (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 корональных 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 [101].

Важным свойством всех изученных АО оказалась явно не случайная связь с обязательно близко находящейся корональной дырой (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.

5.4 Выводы к главе 5

Еще раз отметим общие свойства рассмотренных вспышечных АО, локализованных вне КА.

1. Все эти АО сформировались вблизи КД, либо 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 автора, 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 дают 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 автора, 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 вспышечный потенциал таких систем.

6. Заключение

Основные результаты диссертации могут быть сформулированы следующим образом:

1 . Выполнена обработка данных наблюдений солнечных пятен, проводившихся в течение 24 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 комплексы активности в первой половине 21 и цикла и на протяжении 24 цикла. Определены основные параметры комплексов активности в четырех солнечных циклах.

3 . Проанализирована статистическая связь комплексов активности (КА) на Солнце и солнечных вспышек с рентгеновскими классами выше M0 (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.

4 . 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 комплексах активности (в 82%) и в 80% случаев не дальше, чем в 20 гелиографических градусах от ближайших корональных дыр. При этом рентгеновский класс вспышек плохо коррелирует с потоком протонов на орбите

Земли. Обосновывается 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. [101] с длительной фазой гамма – излучения с целью объяснения особенностей импульсной и длительных фаз таких вспышек и выявления их связи с комплексами активности и корональными дырами. Показано, что 74% таких событий оказались тесно связанными с комплексами активности. Качественно продемонстрирована связь процессов ускорения частиц в ходе развития вспышки с изменениями магнитной топологии во вспышечной области и с эволюцией коронального выброса массы.

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

Таковы в кратком изложении основные результаты, полученные автором.

Автор считает своим долгом указать, что работа состоялась не в последнюю очередь благодаря доброжелательному отношению, помощи и поддержке коллектива астрономической обсерватории ИГУ и руководства научно-исследовательской частью ИГУ. Я благодарна научному руководителю Сергею Арктуровичу Язеву, с которым мы вместе работаем, начиная с времен выполнения курсовой и дипломной работы, а также магистерской диссертации. И обучения в аспирантуре. Я также благодарна коллективу отдела физики Солнца Института солнечно-земной физики СО РАН за внимание к моей работе.

Использованная литература

1. Арсентьев А.Н. Универсальный цифровой астрономический комплекс астрономической обсерватории ИГУ / А.Н.Арсентьев, Д.В.Семенов, С.А.Язев // Избранные проблемы астрономии: материалы науч.-практ. конф. «Небо и Земля» (г. Иркутск, 21-23 ноября 2006 г.) - Иркутск . Иркут. Гос. Ун-т, 2006.- С. 98-100.
2. Алтынцев А.Т., Банин В.Г., Куклин Г.В., Томозов В.М., Солнечные вспышки // М.: Наука, с. 246, 1982
3. Банин В. Г. Комплекс активности и большие вспышки в мае 1981 года // Исслед. по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. М. : Наука, 1983. Вып. 65. С. 129–150.
4. Банин В. Г., Язев С. А. Площадки длительной активности на нисходящей ветви солнечного цикла № 21 // Кинематика и физика небесных тел. 1989. Т. 5, № 4. С. 62–68.
5. Банин В. Г., Язев С. А. ПДА в циклах солнечной активности // Современные проблемы солнечной цикличности : тр. конф., посвящ. памяти М. Н. Гневнышева и А. И. Оля. СПб., 1997. С. 9–13.
6. Банин В. Г., Боровик А. В., Язев С. А. Комплексы активности на 1705–1709 оборотах // Солнечные данные. 1988. № 5. С. 82–88.
7. Банин В.Г., Боровик А.В., Трифонов В.Д., Язев С.А. Об астроклимате Байкальской астрофизической обсерватории. В сб.: Исслед. по геомагн., аэрон. и физ. Солнца, М., Наука, 1982, вып.60, 28-34.
8. Банин В. Г., Язев С. А. Каталог площадок длительной активности в 1980–1989 годах // Исслед. по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. М. : Наука, 1991. Вып. 95. С. 141–148.
9. Боровик А.В., Головкин А.А., Поляков В.И., Трифонов В.Д., Язев С.А. Исследования солнечной активности в Байкальской астрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН. / Солнечно-земная физика, 2019. Т. 5, № 3. С. 21-35.
10. Брей Р., Лоухед Р. Солнечные пятна. М. : Мир, 1967. 383 с

11. Витинский Ю. И., Копецкий М., Куклин Г. В. Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. М. : Наука, Гл. изд. физ.-мат. лит., 1986. 296 с.
12. Головкин А. А. Некоторые особенности структур комплекса активности, давшего мощные протонные вспышки 13–16 мая 1981 года // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. М. : Наука, 1983. Вып. 65. С. 121–129.
13. Жеребцов Г. А., Язев С. А. Международный гелиофизический год // Вестн. РАН. 2008. Т. 78, № 3. С. 202–215
14. Жукова О. В., Язев С. А. Вспышки вне пятен в 22 цикле солнечной активности // Исслед. по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. 2001. Вып. 113. С. 136–140.
15. Зирин Г. Солнечная атмосфера. М. : Мир, 1969. 504 с.
16. Иванов Е. В. Крупномасштабная структура солнечного магнитного поля и распределение групп пятен с аномальным углом наклона полярной оси к экватору // Солнечные данные. 1986. № 11. С. 52–56.
17. Исаева Е.С., Язев С.А. Рентгеновские вспышки и комплексы активности на Солнце в фазе роста 24-го цикла // Солнечно-земная физика, вып.22, 2013, с 3-11.
18. Ишков В.Н. Солнечные вспышечные суперсобытия: когда они могут происходить и энергетические пределы их реализации // Сборник статей Междисциплинарного коллоквиума «Космические факторы эволюции биосферы и геосферы», Москва, 21–23 мая 2014 г. Ред. В.Н. Обридко. СПб.: ВВН. 2014. С.85-98.
19. Ишков В. Н., Могилевский Э. И. Эволюция комплексов вспышечноактивных областей на Солнце // Солнечная активность. Алма-ата : Изд-во Каз. ССР, 1983. С. 3–20.
20. Ишков В.Н. Космическая погода и особенности развития текущего 24-го цикла солнечной активности // Геомагнетизм и аэронаука. 2018, Т. 58. № 6. С.785-800

21. Ишков В. Н., Земля и Вселенная, № 3, 22, 2010
22. Каверина-Куклина А.А. Директор астрономической обсерватории ВСОРГО А.А.Каверин. / А.А.Каверина-Куклина // Избранные проблемы астрономии: Труды уч.-практ.конф. Под ред. С.А.Язева.- Иркутск : Изд-во "Облмашин-форм", 2001, С.61-64.
23. 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.- Вып. 12, том 1.- С. 76.
24. Крамынин А.П. Сравнение наблюдений солнечных пятен Уссурийской астрономической обсерватории ДВО РАН и астрономической обсерватории ИГУ. / А.П.Крамынин, С.А.Язев, С.И.Расчетин, Р.В.Чванов // Избранные проблемы астрономии : материалы III Всерос. астрон. конф. «Небо и Земля». – Иркутск, Из-во ИГУ, 2011, С. 142-146.
25. Комарова Е. С., Сидоров В. И., Язев С. А. Особенности развития солнечной вспышки 19 октября 2001 г. // Солнечно-земная физика. 2004. Вып. 6 (119). С. 90–92.
26. Каталог <http://umbra.nascom.nasa.gov/SEP/>
27. Каталог <http://gong.nso.edu/data/magmap/QR/mqf/>
28. Каталог ядер КА – адрес будет уточнен
29. Лыхин Ю.П. Телескоп Цейсса в Сибири. История длиной в век. / Ю.П.Лыхин, Э.Г.Зуев, С.А.Язев // Избранные проблемы астрономии: Труды уч.-практ.конф. Под ред. С.А.Язева.- Иркутск : Изд-во "Облмашин-форм", 2001, С.36-39.
30. Минасянц Г.С., Минасянц Т.М. , Томозов В.М. , Геомагнетизм и аэрономия. 56. С. 690, 2016
31. Минасянц Г. С., Минасянц Т. М., Томозов В. М. Особенности развития длительных потоков высокоэнергичного гамма-излучения на разных стадиях солнечных вспышек // Солнечно-земная физика, 5, № 3, с. 11-20, 2019
32. Обридко В.Н., Наговицин Ю.А./ Солнечная активность, цикличность и методы прогноза/ Санкт-Петербург, Изд-во: ВВМ, 2017

33. Обридко В. Н. Солнечные пятна и комплексы активности. М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1985. 256 с.
34. Плазменная гелиогеофизика, М.: изд-во Наука, 2008
35. Прист Э. Р., Форбс Т. Магнитное пересоединение. Магнитогидродинамическая теория и приложения // М: Физматлит, 2005
36. Рябов М. И., Лукашук С. А. Комплексы активности и их роль в аномальной активности северного и южного полушария Солнца // Циклы активности на Солнце и звездах. СПб. : Изд-во ВВМ, 2009. С. 121–134.
37. Синоптические карты корональных дыр
<http://gong.nso.edu/data/magmap/QR/mqf/>
38. Смит Г., Смит Э. Солнечные вспышки. М. : Мир, 1966. 426 с.
39. Солнечная и солнечно-земная физика. Иллюстрированный словарь терминов / ред. Бруцек А., Дюран Ш. М. : Мир, 1980. 254 с.
40. Филиппов Б.П. Эруптивные процессы на Солнце. М.: Физматлит, 2007
41. Чистяков В. Ф. Изучение солнечной активности геохронологическими методами // Современные проблемы солнечной активности. СПб. : ГАО РАН, 1997. С. 419–422.
42. Язев С.А. Комплексы активности в 24-м цикле солнечной активности. / Астроном. Ж. 2015. Том 92, № 3. С.260-269.
43. 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». Сборник тезисов докладов. – САО РАН, Нижний Архыз. 28 сентября – 2 октября 2006 г. - С. 69.
44. Язев С.А., Коротких А.В., Тарлюк И.Г. Комплексы активности в циклах Швабе-Вольфа / Солнечно-земная физика , 2011, вып. 19 (132). С. 3 -8.
45. Язев С.А., Томозов В.М., Исаева Е.С. Комплексы активности и корональные дыры: феноменология связи / Астрон. Журнал ,2022-03-17

46. Язев С. А. О некоторых особенностях вспышки 23 августа 1988 года // Солнечные данные. 1990. № 7. С. 77–81.
47. 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.
48. Язев С. А. Комплексы активности на Солнце в 23 цикле активности // Солнечно-земная физика. 2010 б. Вып. 16. С. 94–101.
49. Язев С.А., Ульянова М.М., Исаева Е.С. Комплексы активности на Солнце в 21 цикле солнечной активности // Солнечно-земная физика, №4, том 7, 2021
50. Язев С. А., Изв. Иркутск. гос. ун-та. Сер. Науки о Земле № 5, 295, 2012
51. Язев С. А., Феномен комплексов активности на Солнце// Иркутск: Изд-во ИГУ, 2014
52. Язев С. А., Рожина А. И., в сб: Труды IV съезда Астрономического общества, Москва, 19–29 ноября 1998 г. (М.: СП, 1998), с. 237
53. Язев С. А., Сидоров В. И., В сб: Труды X конференции молодых ученых «Современные проблемы в астрофизике и физике космической плазмы». Иркутск, ИО ИСЗФ СО РАН, с. 65, 2007
54. Язев С.А., в сб: Астрономия-2018. Солнечно-земная физика – современное состояние и перспективы. Том.2 Москва, Изд-во ИЗМИРАН, с. 274, 2018
55. Antalova A. and Ogir M. B., Astron. Inst. Czechosl. 35, 276, 1984.
56. Antalova A. and Ogir M. B., Bull. Astron. Inst. Czechosl. 37, 344, 1986
57. Antalova A. and Ogir M. B., Bull. Astron. Inst. Czechosl. 39, 97, 1988
58. Antiochos S.K., DeVore C.R., Klimchuk J.A. Astrophys. J., 510, p. 485, 1999
59. Akimov V.V., Ambrož P., Belov A.V., Berlicki A. et al., Solar Physics, V. 166, pp. 107-134, 1996.
60. Baker D. L, van Driel-Gesztelyi, Attrill G. D. R.. Astron. Nachr., 328, № 8, p.773, 2007
61. Bumba V., Garcia A., and Jordan S.. Astron Astrophys. 329, № 3, p.1138, 1997

62. Bumba V.. In: Solar Maximum Analysis. Additional Issue. Proceedings of the International Workshop held in Irkutsk, USSR, 17-24 June, 1985. Novosibirsk: Nauka, Siberian Division, 255, 1988
63. Bumba V., Howard R. Large-scale distribution of solar magnetic fields // *Astrophys. J.* 1965. Vol. 141, N 4. P. 1502–1512
64. Dodson H. W., Hedeman E. R. Major H α flares in centers of activity with very small or no spots // *Solar Phys.* 1970. Vol. 13, N 2. P. 401–409.
65. Desai M., Ciacalone J., *Living Rev. Sol. Phys.* 13, 1, 2016
66. De Rosa D. F., Barnes G. . *Astrophys. J.*, 861, № 2, p 10, 2018
67. Eselevich V.G. , Eselevich M.V., Sadykov V.M., Zimovets A.V., *Adv. Space Res.*, 56, 2793, 2015
68. Gaizauskas V., Harvey K. L., Harvey J. W., Zwaan C. Large-scale patterns formed by active solar regions during the ascending phase of cycle 21 // *Ap. J.* 1983. Vol. 265. P. 1056–1065.
69. Gary G. A., Moore R. I. *Astrophys. J.*, 611, p. 545, 2004
70. Gou T., Liu R., Veronig A., Dickson E., Hernandez-Perez A.. 42nd COSPAR Scientific Assembly: held 14-22 July 2018, Pasadena, California, USA/ Abstract id: D2, 3-15-18
71. Gopalswamy N., Mäkela P., Yashiro S. et al. *Astrophys. J. Lett.* 868, № 19, p.8 ,2018
72. Ishkov V.N. *Geomagnetism and Aeronomy* // 53. 1, 2013
73. Isaeva E. S., Tomozov V. M., and Yasev S. A. X-Ray Flares and Activity Complexes on the Sun in Solar Cycle 24. *Astronomy Reports*, 2020, Vol. 64, No. 1, pp. 58–65.
74. Ishkov V. N., Kotrc P., Kulcar L. Complexes of active regions evolution, connections with solar flares and distributions in the 20 and 21 cycles of Solar Activity // *Solar Maximum Analysis. Additional Issue Proceedings of the International Workshop held in Irkutsk, USSR, 17–24 June 1985. Novosibirsk : Nauka, Siberian Division, 1988. P. 119–123.*

75. Isaeva E.S., Tomozov V.T., Yazev S.A. Proton Flares in Solar Activity Complexes: Possible Origins and Consequences / *Astronomy Reports*, 2018, Vol. 62, No. 3, pp. 243–250.
76. Kaplenko V.V. Photospheric observations at the solar telescope of the Irkutsk state university`s astronomical observatory. – V.V.Kaplenko, S.I.Raschetin, S.A.Yazev, D.V. Yerofeyev // *International Heliophysical Year: new insights into solar-terrestrial physics (IHY2007-NISTP)*. November 5-11, 2007. Zvenigorod, Moscow Region. - Troitsk, Moscow Region, IZMIRAN, 2007.- Abstracts. - P.51.
77. Kitchatinov L.L., [Khlystova A. I.](#) North-South asymmetry of solar dynamo in the current activity cycle / [Astronomy Letters](#), 2014. V. 40, PP 663–666.
78. Kallenrode M-B., *J. Phys. G: Nucl. Part Phys.* 29, p. 965, 2003
79. Klecker B., *J. Phys. Conf. Ser.* 409, p. 1,2013
80. Kahler S.W., Arge C.N., Akiyama S., Gopalswamy N., *Solar Phys.* 289, 657, 2014
81. Kunches J.M., Zwickl R.D., The effects of coronal holes on the propagation of solar energetic protons. 281, 1999
82. Kichigin G. N., Miroschnichenko L. I., Sidorov V., Yazev. S. A. *Plasma Physics (in Russian)*, 40, № 3, p. 241, 2014
83. Kong D. F., Pan G. M., Yan X. L., Wang J. C. and Li Q. L.. *Astrophys. J. Let.*, 863, № 22, p. 7, 2018
84. Li L. P., Zhang J., Su J. T., Liu I.. *Astrophys. J. Let.* 829, № 33, p.7, 2016
85. Lynch B. J., Edmondson J. K., Li Y. . *Solar Phys.*, 289, p. 3043, 2014
86. Maehara H., Shibayama T., Notsu S., et al. Superflares on solar-type stars // *Nature*, v. 485, issue 7399, p. 478, 2012
87. Manchester W., Kilpua K. J., Liu Y. D. et al. *Space Sci. Rev.*212, p. 1159, 2017
88. Masson S., Antiochos S.K., DeVore. C.R. *Astrophys. J.*, V. 884, N2, p. 143, 2019
89. McIntosh P. S., Wilson P. R. A new model for flux emergence and the evolution of sunspots and the large-scale fields // *Solar Physics*. 1985. Vol. 97, N 1. P. 59–79.
90. Moffatt H. K.. *J. Fluid Mech.*, 159, p. 359, 1985
91. Murphy R.J., Dermer C. D., Ramaty R. // *Astrophys. J. Suppl.* 63, 721, 1987

92. Nagovitsin Yu. A., Pevtsov A. A.. *Astrophys. J. Letters.* 833, p.94, 2016
93. Nagovitsin Yu. A., Pevtsov A. A., Osipova A. A., Tlatov A. G., Miletskii E. V. and Nagovitsina E. Yu. *Astronomy Letters*, 42, p. 703, 2016
94. Nitta N.V., Reames D.V., De Rosa M.L., Liu Y., *Astrophys. J.* 650, p. 438, 2006
95. Olemskoy S. V., Kitchatinov L.L. Grand Minima and North-South asymmetry of solar activity. / *Astrophys. J.* 2013, 777, N1. P. 71.
96. Osipova A. A., Nagovitsin Yu. A., *Geomagnetism and Aeronomy*, 57, № 8, p.1092, 2017
97. Pallavicini R., Serio S., Vaiana G., *Astrophys. J. P. I.* 216, p. 108, 1977
98. Penn M. J., Livingston W. Long-term evolution of sunspot magnetic fields / *The Physics of Sun and Star Spots. Proceedings IAU Symposium No. 273*, 2010, PP 126-133.
99. Reames D.V., *Space Sci. Revs.* 175, p. 53, 2013
100. Share G.H., Murphy R.G., Tolbert K., Dennis B. et al. ArXiv 1711.01511v1, GSFC, January 5, 2017
101. Share G. H., Murphy R.G., White S.M. et al. // *Astrophys. J.*, 869, 182, 2018
102. Shibata K., Isobe H., Hillier A. et al. Can Superflares Occur on Our Sun? // *Publications of the Astronomical Society of Japan*, v. 65, No. 3, Article No.49, 8, 2013
103. Shen C., Wang Y., Ye P., Wang S., *Astrophys. J.* 639, 510 , 2006
104. Shen C.L., Yao J., Wang Y.-M., Ye P.-Z., Zhao X.-P., Wang S.. *Astron. Astrophys.* 10, 1049, 2010
105. Suri A.N., Chupp E.L., Forrest D.J., Reppin C. // *Solar. Phys.*, 43, 415, 1975
106. Somov B.V., *Plasma Astrophys. P. I. Fundamental and Practice.* p.498, 2013
107. Somov B.V., *Plasma Astrophys. P. II. Reconnection and Flares.* p.524, 2013
108. Torsti J., Kocharov L., Innes D.E., Laivola J., Sahla T., *Astron. Astrophys.* 365, p. 474, 2005
109. Wang Y.-M., Pick M., Mason G.M., *Astrophys. J.* 639, 495, 2006
110. Warren H. P., Brooks D. H., Ugarte-Urra I., Reep J. W., Crump N. A., Doschek G. A.. *Astrophys. J.* 854, № 122, p.12, 2018

111. Yan X. L., Yang L. Y., Xue Z. K. et al. *Astrophys. J. Let.* 853, № 18, p.7, 2018

112. Yazev S.A., Spirina E.A., *Geomagnetism and Aeronomy.* 49, p 898, 2009

113. Yazev S. A. , *Astron. Rep.* 59, 228, 2015

114. Zhang J., Dere K.P., Howard R.A., Kundu M.R., White S.M., *Astrophys. J.* 559, 452, 2001