

Утверждаю



Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Главной (Пулковской) астрономической
обсерватории РАН (ГАО РАН)

Н. Р. Ихсанов д.ф.-м.н. Н. Р. Ихсанов

11 мая 2023 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН
на диссертационную работу Исаевой Елены Сергеевны «СТАТИСТИКА
ВСПЫШЕК В КОМПЛЕКСАХ АКТИВНОСТИ НА СОЛНЦЕ»,
представленную на соискание учёной степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.3.1 – физика космоса, астрономия

1. Актуальность темы диссертации

Работа посвящена исследованию комплексов активности (КА) на Солнце и их связи с энергичными солнечными событиями. Известно, что солнечная активность оказывает влияние на околоземную и наземную инфраструктуру, поэтому с практической точки зрения тема диссертационной работы безусловно является актуальной и важной. Помимо прикладного также важен и теоретический аспект заявленной темы, поскольку так называемая стандартная модель солнечной вспышки не учитывает всего разнообразия явлений, обнаруженных за последние десятилетия, и нуждается в расширении и уточнении, в частности, для улучшения прогноза солнечных вспышек, а следовательно, и космической погоды.

2. Новизна исследований и полученных результатов

Исследования, представленные соискателем в диссертационной работе, являются прямым продолжением предыдущих работ научного руководителя. Следует отметить следующие новые результаты.

- В рамках рассматриваемой модели, принятой соискателем в качестве базовой модели для определения комплексов активности, впервые были идентифицированы КА в 24 цикле, составлен каталог, создана база данных,

вычислен вспышечный индекс для всех активных областей (АО), входящих в состав комплексов активности.

- Соискателем установлено, что более 80% солнечных вспышек разных типов в 24 цикле происходили в активных областях в составе комплексов активности, а также был выделен редкий класс вспышечно-активных областей вне комплексов активности.

- Соискателем показано, что все комплексы активности, где происходили энергичные события, находились рядом с корональными дырами.

3. Научная и практическая значимость

Значимость диссертационной работы заключается в возможности широкого практического применения созданных соискателем каталогов и баз данных комплексов активности и связанных с ними энергичных событий на Солнце.

4. Степень обоснованности и достоверности результатов

Результаты, 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.

- В рамках модели идентификации комплексов активности, принятой соискателем в качестве базовой, полученные результаты выглядят самосогласованными. Кроме того, они согласуются с результатами некоторых других авторов. Однако, есть альтернативные подходы, на которые соискателю следовало бы обратить внимание (см. раздел «Замечания»).

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.

- Достоверность данного результата обеспечивается использованием корректных методов анализа, в рамках принятой базовой модели, и согласуется с современными результатами исследований.

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.

- Этот результат согласуется с результатами, полученными другими группами исследователей с использованием методов, отличных от метода, применённого соискателем.

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

- Данный результат требует доработки с учётом современных моделей.

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.

- Для создания каталогов и баз данных соискателем собственноручно были проведены наблюдения Солнца в астрономической обсерватории ИГУ. Также были использованы имеющиеся в наличии и широко использующиеся в научном сообществе данные других обсерваторий. Для обработки и анализа наблюдательных данных использовались как авторские программы, так и программы, успешно работающие в других обсерваториях, что позволяет доверять результатам обработки данных.

Основные результаты диссертации отражены в 15 публикациях, среди которых 6 статей в рецензируемых научных журналах из списка ВАК, 3 свидетельства гос. регистрации баз данных, 5 работ в материалах конференций. Результаты были представлены на шести российских и международных конференциях.

Личный вклад соискателя Исаевой Е. С. заключался в (1) собственноручном мониторинге солнечных пятен, начиная с 2013 года, проводимом в астрономической обсерватории ИГУ, (2) предварительной обработке

наблюдений на основе лично разработанной методики, (3) полной обработке фотогелиограмм, (4) непрерывном ведении каталога солнечной активности в 24–25 циклах, (5) создании синоптических карт для исследования локализации вспышек по отношению к расположению комплексов активности и корональных дыр, (6) дополнении каталогов данными о КА в 21 солнечном цикле. Соискатель является основным соавтором баз данных комплексов активности и энергичных событий в них, на которые были оформлены государственные патенты. Соискатель является первым соавтором большинства статей, на основе которых была написана диссертационная работа.

5. Структура и объём диссертационной работы

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

Во **введении** обосновывается актуальность работы, формулируется её цель, научная новизна, практическая значимость, кратко излагается содержание диссертации, приводятся основные положения, выносимые на защиту, оценивается личный вклад автора.

В **первой главе** описываются использованные данные наблюдений и методика их обработки и анализа. Описываются методика идентификации комплексов активности, а также базы данных КА, каталоги энергичных событий, синоптические карты.

Во **второй главе** представлено исследование статистической связи разных типов мощных рентгеновских вспышек с комплексами активности. Анализируются КА в 21 и 24 циклах и сравниваются с 22 и 23 циклами. Анализируется асимметрия «север-юг» для КА, анализируется мощность циклов. Анализируются долгоживущие LDE-события. Обсуждаются возможные механизмы связи рентгеновских вспышек на Солнце с комплексами активности.

В **третьей главе** аналогичным образом анализируется феноменологическая связь сильных протонных вспышек с комплексами активности, а также исследуется и обсуждается роль корональных дыр, корональных выбросов массы в повышении вспышечной активности КА.

В **четвёртой главе** анализируется связь вспышек с длительным гамма-излучением с комплексами активности и с корональными дырами. Качественно обсуждается механизм долгоживущего гамма-излучения вспышек.

В пятой главе представлен анализ вспышек в активных областях за пределами комплексов активности.

В заключении приведены основные результаты работы.

6. Замечания по работе

Замечание к Главе 1.

Идентификация комплексов активности, вошедших в каталоги и базы данных, на основе которых получены результаты диссертационной работы, было проведено соискателем, исходя из базовой модели, согласно которой ядра комплексов активности не подвержены дифференциальному вращению Солнца (в отличие от ветвей КА или АО вне комплексов активности). К данному предположению нужно подходить с осторожностью. Получается, что КА вращаются «твердотельно» с Солнцем, но, согласно современным представлениям, активные области образуются именно благодаря дифференциальному вращению Солнца. Структура же скоростей дифференциального вращения по радиусу и по гелиографической широте получена в работе (Schou et al., 1998, ApJ, 505, 390, веб сайт: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1998ApJ...505..390S/abstract>, см. Рис. 5), согласуется с наблюдениями SOHO/MDI и пока не опровергнута. Возможно, стоит обратить внимание на различную глубину оснований АО для более тонкой настройки модели. Кроме того, даже если принять «твердотельность» вращения ядер КА, не понятно почему они должны вращаться именно с Кэррингтоновской скоростью.

Замечание к Главе 2.

1. Возможно, с несовершенством модели связано относительно высокое появление LDE-вспышек вне комплексов активности (п. 2.5 диссертации). Соискатель утверждает, что с комплексами активности связано 60% всех LDE-вспышек (41% в ядрах + 19% в ветвях) и 40% вне КА. Однако, если посмотреть на эту статистику с точки зрения дифференциального вращения, то результаты инвертируются, и с кэррингтоновским вращением остаётся связанным 41% вспышек, в то время как с дифференциальным вращением — 59% (19% в ветвях + 40% вне КА). Такое распределение вспышек совпадает с распределением активных областей относительно КА: 41% — в ядрах, 19.1% — в ветвях, 39.8% (см. п. 2.3.1 диссертации).

2. При анализе асимметрии КА в северном и южном полушариях необходимо провести сравнение с результатами других авторов (см., например, Zhukova et al., 2023, AdSpR, 71, 1984 и ссылки внутри, веб сайт: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023AdSpR..71.1984Z/abstract>).

3. Рис. 2.3.: «Из рисунка видно, что коэффициент асимметрии K квазипериодически менял знак — ядра КА превалировали поочередно то в северном, то в южном полушарии.»

- Здесь наблюдается чередование коэффициента асимметрии, но не квазипериодичность. Характерные временные масштабы интервалов постоянного знака асимметрии может дать статистический анализ (например, фурье-, вейвлет) за несколько циклов (чтобы набрать большую длину временного ряда), который проведён не был.

Замечание к Главе 3.

Интересно было бы сопоставить результаты, полученные для каталога протонных событий, использованного в диссертации, с результатами, полученными на основе другого каталога, например, https://swx.sinp.msu.ru/apps/sep_events_cat/index.php?gcm=1&lang=ru.

Замечание к Главе 4.

1. Из текста главы не понятно, в каком интервале энергий оценивалась длительность долгоживущих гамма-всплесков: в разных интервалах разная длительность.

2. Соискатель утверждает: «В переходной области между открытым и закрытым магнитным потоком формируются выходящие в корону Солнца трубки магнитного поля и генерируются потоки альвеновских волн [34].»

- Данное утверждение требует более аккуратного рассмотрения, поскольку подобная генерация не подтверждается наблюдениями короны на современных инструментах. Кроме того, не дано определение структуры (конфигурации) магнитных каналов, связывающих КА с корональными дырами, в результате чего не совсем понятно, как распространяющиеся вдоль магнитного поля альвеновские волны могут достичь активных областей, которые не связаны с магнитными потоковыми трубками, по которым эти волны распространяются. Возможно, имеет смысл рассмотреть механизм индуцирования вспышек быстрыми магнитозвуковыми МГД волнами, предложенный в работе (Nakariakov et al., 2006, A&A, 452, 343, веб сайт: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2006A%26A...452..343N>).

Кроме того, соискателем утверждается, что стандартная модель вспышки подтверждается проведённым в диссертации исследованием. С другой стороны, написано, что ускоренные частицы выходят «в корону и гелиосферу», что не в полной мере соответствует стандартной модели корональной природы вспышки.

Поскольку на защиту выносятся именно **феноменологическая** модель связи комплексов активности с энергичными событиями на Солнце, основанная на существовании сложной крупномасштабной структуры магнитного поля, вышенаписанные замечания не умаляют результаты, полученные соискателем, однако должны быть рассмотрены, прокомментированы и учтены в последующих работах.

Помимо этих замечаний, есть некоторые не столько существенные замечания, также не умаляющие результаты исследований. Например, в п.1.2 не указано, что наблюдения магнитных полей солнечных пятен проводятся также в Крымской астрофизической обсерватории с 1957 года (веб сайт: <https://sun.crao.ru/observations/sunspots-magnetic-field>).

В п. 4.1 опечатка: «Импульсная фаза вспышек с длительным гамма-излучением определялась по поведению профилей рентгеновского излучения в спектральной области (1-8 Å) по данным с SDO [31]». Должно быть, по-видимому, не «рентгеновского излучения», а фотосферной яркой эмиссии в линии λ 1700 Å.

В п. 4.4: «с использованием известной модели «прорыва» [69; 58]». Общепринятое название этой модели — «стандартная модель солнечной вспышки».

Таблица 2.5 является дублем Таблицы 2.1.

В тексте отсутствует расшифровка аббревиатуры «МГД». Расшифровки аббревиатур «КА» и «АО», вводятся в тексте позже, зато «КА» - два раза. Также аббревиатура «КА» дублируется, обозначая одновременно комплекс активности и космический аппарат (см. стр. 93). Список литературы и ссылки на него, видимо, не были организованы автоматически, что привело к появлению ошибок. Например, ссылки на каталоги [26] и [27] в Главе 3 в нескольких местах меняются местами; в ссылке на работу [101] должно быть Murphy R. J. Кроме того, список литературы не организован согласно требованиям ВАК. В тексте диссертационной работы наблюдаются многочисленные опечатки.

7. Вывод

Оценивая работу в целом, следует ещё раз отметить её практическую значимость, заключающуюся в возможности широкого практического применения созданных соискателем каталогов и баз данных, в частности, для возрождающейся Всероссийской службы Солнца. Результаты диссертации могут представлять интерес для следующих научно-исследовательских учреждений: ГАО РАН, КрАО РАН, ГАИШ МГУ, ИЗМИРАН, ИСЗФ СО РАН

и других отечественных и зарубежных организаций, в которых проводятся исследования Солнца и солнечной активности.

Работа представляет собой оригинальное исследование. Содержание диссертации согласуется с материалами статей, опубликованных соискателем. Основные выводы диссертации полностью соответствуют целям, задачам и положениям, выносимым на защиту. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертационной работы. Представленная диссертационная работа соответствует специальности 1.3.1 – физика космоса, астрономия, а её автор Исаева Елена Сергеевна заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук при адекватном ответе на замечания.

Отзыв составила к.ф.-м.н. с.н.с. Лаборатории радиоастрономии ГАО РАН Куприянова Елена Геннадьевна. Отзыв обсужден и одобрен на объединённом семинаре научных подразделений ГАО РАН 10 мая 2023 года.

С.н.с. Лаборатории радиоастрономии ГАО РАН  Е.Г. Куприянова

Телефон: +79062452234

Email: elenku@bk.ru

Сведения о ведущей организации

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН (ГАО РАН)

Телефон: +7(812)3637403

Email: map@gaoran.ru

Почтовый адрес: 196140 Санкт-Петербург, Пулковское шоссе 65/1