

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.Ломоносова

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
имени Д.В.Скобельцына

На правах рукописи

Яковчук Олеся Станиславовна

ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ
СОЛНЕЧНОЙ И ГЕЛИОСФЕРНОЙ АКТИВНОСТИ

01.04.08 – физика плазмы

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2007

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте ядерной физики
имени Д.В.Скобелева Московского государственного университета
имени М.В.Ломоносова

Научный

руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Веселовский Игорь Станиславович

Официальные

оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Гецелев Игорь Владимирович
НИИЯФ им. Д.В. Скобелева МГУ
имени М.В. Ломоносова

кандидат физико-математических наук, доцент
Кононович Эдвард Владимирович
Государственный астрономический институт
имени П.К. Штерберга МГУ

Ведущая организация: **Институт земного магнетизма, ионосферы и
распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова,
РАН**

Защита состоится "15" мая 2007 года в 15:00 часов на заседании
диссертационного совета К501.001.03 в Московском государственном
университете им. М.В.Ломоносова по адресу: 119992, Москва, Ленинские
горы, МГУ, НИИЯФ, 19-й корпус, аудитория 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ.

Автореферат разослан "13" апреля 2007 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

Манагадзе А.К.

Общая характеристика работы

Актуальность

В мировой науке и в практических применениях исследования Солнца и солнечно-земных связей занимают одно из ведущих мест. Это объясняется тем влиянием, которое солнечная активность оказывает на физические процессы, происходящие на Земле и в околоземном космическом пространстве – магнитосфере и ионосфере, а также на атмосферные и биологические явления.

Известно, что солнечная активность и связанные с ней процессы в ближнем космосе испытывают некоторые циклические изменения, на которые бывают наложены сильные и трудно предсказуемые спорадические возмущения. Наиболее хорошо исследованы одиннадцатилетние циклы, которые прослеживаются на протяжении многих столетий.

Одной из самых замечательных особенностей Солнца являются почти периодические, регулярные изменения различных проявлений солнечной активности, т.е. всей совокупности наблюдаемых изменяющихся (быстро или медленно) явлений на Солнце. Самым долговременным индексом солнечной активности считаются солнечные пятна. Ещё в 1848 году Вольф показал, что относительные числа солнечных пятен, претерпевают циклические колебания, причём средняя длина этого цикла составляет 11.1 года. Несмотря на то, что периодичность солнечных циклов обнаружена довольно давно, остаётся открытым вопрос о том, что считать минимумом солнечного цикла. В течение времени наблюдений солнечных пятен существуют несколько необычных периодов пониженной солнечной активности. Один из таких периодов – минимум Дальтона на стыке XVIII – XIX столетий, с которым связана так называемая фазовая катастрофа в солнечных циклах.

Изучение Солнца и солнечно-земных связей ведётся наземными и космическими средствами наблюдений. При этом за последние годы наиболее значительные результаты достигнуты здесь благодаря новым космическим исследованиям на таких аппаратах, как GOES, SOHO, TRACE, КОРОНАС.

Многие виды наблюдений возможны только из космоса и этим определяется незаменимое место таких исследований в физике Солнца и в солнечно-земной физике. Все возрастающее понимание влияния факторов «космической погоды» на геосферу и различные сферы человеческой деятельности определяет практическое значение исследований в этой области.

Исследование экстремально сильных возмущений на Солнце, в гелиосфере и магнитосфере представляет большой практический интерес, как для прогнозирования, так и для оценки проявлений космической погоды. Все наиболее сильные гелиосферные и магнитосферные возмущения имеют свои причины на Солнце, которые часто ассоциируются с теми или иными наблюдательными признаками и проявлениями солнечной активности.

В настоящее время после наблюдения в 2003-2006 году экстремальных по своей силе возмущений на Солнце, в гелиосфере и магнитосфере стала особенно актуальна проблема, связанная с изучением причин и особенностей таких событий.

Цель работы

Основной целью диссертационной работы является анализ накопленного материала об условиях экстремально сильной и слабой солнечной активности, выяснение их причин и движущих сил. Поставлена задача ретроспективного исследования и детального рассмотрения отдельных ситуаций и событий, наблюдавшихся в цепочке солнечно-земных связей.

Научная новизна

- 1) На основе анализа расширенного набора данных о распределении солнечных пятен по широте для последних 12 циклов заново определены моменты времени для минимумов циклов солнечной активности. Уточнения проводятся отдельно для северной и южной полусфер Солнца. Получено обобщение правила Вальдмайера для чисел Вольфа с учётом новых

последних циклов, и подтверждение для двух других индексов солнечной активности. На этой основе впервые показано, что введение гипотетически “потерянного” солнечного цикла в период экстремально низкой солнечной активности (минимум Дальтона) противоречит этому твёрдо установленному правилу.

- 2) Впервые проведен статистический анализ экстремальных возмущений солнечной активности по совокупности трёх основных характеристик “космической погоды”, важных в научных и прикладных задачах (рентгеновское излучение, поток энергичных протонов, геомагнитные возмущения).
- 3) Собраны и проанализированы новые данные об экстремально сильных проявлениях солнечной и гелиосферной активности в 2003-2006 г. Эти проявления оказались рекордными по величине целого ряда параметров.

Научная и практическая значимость работы

- 1) Данное исследование позволяет лучше понять как отдельные ситуации и события на Солнце и в гелиосфере во время экстремально высокой солнечной активности, так и глобальную картину изменений и асимметрии Солнца в эти периоды.
- 2) Проведённое исследование необходимо для более детального описания циклических процессов на Солнце и для прогнозов следующих циклов.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Уточнены моменты времени для минимумов циклов солнечной активности на основе анализа расширенного набора данных о распределении солнечных пятен по широте для последних 12 циклов. Уточнения проводятся отдельно для северной и южной полусфер Солнца. Показано, что нарастание числа групп пятен происходило в среднем за 12 циклов на полгода быстрее в южном солнечном полушарии. Правило Вальдмайера обобщено с учётом новых последних циклов для чисел Вольфа. Установлено, что это правило

справедливо и для других индексов солнечной активности. Показано, что гипотеза о потерянном солнечном цикле противоречит установленному правилу.

2. Составлена база данных по экстремальным возмущениям, которая насчитывает 85 событий за период с 1859 по 2006 год. На этой основе сделан вывод, о том, что наблюдается тенденция сильных событий проявлять себя экстремально по всем основным параметрам.
3. Большое физическое разнообразие экстремально сильных проявлений солнечной активности не сводится к каким-либо универсальным сценариям. На примере событий 2003 года показано, что возрастание солнечной активности в такие периоды носит не только локальный характер, но является и глобальным.

Достоверность

- Достоверность результатов подтверждается выбором наиболее надёжных данных, проверенных методов обработки и соответствием с результатами других авторов в тех случаях, когда это было возможно сделать.
- Особое внимание в работе обращено на критический анализ недостоверных гипотез.

Методы исследования

В диссертационной работе использовались методы компьютерного моделирования, стандартные статистические методы, строгие результаты теории вероятности и математической статистики.

Вклад автора

Автор принимал участие в постановке задач и выборе метода их решения. Проделал большую работу по обработке и анализу экспериментального материала. Вклад автора в осуществление расчётов и анализ результатов является определяющим. При анализе полученного материала автором привлекались данные, полученные в проектах “КОРОНАС”, GOES, SOHO,

ACE и WIND, а также работы других авторов, посвящённые исследованию солнечных экстремальных событий.

Апробация работы

Результаты, полученные в настоящей диссертации, доложены на 7 всероссийских и международных конференциях:

1. 35th COSPAR Scientific Assembly, Paris, France, 18 - 25 July 2004.
2. Ломоносовские чтения 2004.
3. IX Пулковская международная конференция "Солнечная активность как фактор космической погоды", 4-9.07.2005, Санкт-Петербург, ГАО РАН.
4. Всероссийская конференция "Экспериментальные и теоретические исследования основ прогнозирования гелиогеофизической активности", 10-15.10.2005, г. Троицк, ИЗМИРАН.
5. X Пулковская международная конференция по физике Солнца, "Квазипериодические процессы на Солнце и их геоэффективные проявления", 6-8 сентября, 2006г., Санкт-Петербург.
6. Всероссийская конференция "Многоволновые исследования Солнца и современные проблемы солнечной активности", 28 сентября- 2 октября 2006 г., Нижний Архыз.
7. Конференция-совещание по программе ОФН-16 «Плазменные процессы в Солнечной системе», 12 -16 февраля, 2007 г. , ИКИ РАН, Москва.

Публикации

Основные результаты изложены в 9 публикациях, в том числе 6 в рецензируемых журналах и 3 в трудах российских и международных конференций.

Структура работы

Диссертация состоит из 3 глав, а также введения и заключения.

Краткое содержание работы

Во **введении** сформулирована цель работы, обосновывается ее актуальность; описывается структура и приводится краткое содержание диссертации; приводятся основные положения, выносимые на защиту.

В главе 1 “**Экстремально низкая солнечная активность**” излагаются общие сведения о циклах солнечной активности, а также обобщаются основные правила, описывающие цикличность.

В разделе 1 главы 1 “**Уточнение моментов времени для минимумов циклов солнечной активности**” вычислены значения моментов времени минимумов циклов солнечной активности по диаграммам “бабочек Маундера” для северной и южной полусфер Солнца на основе метода кластеризации. Работа проведена для последних 12 циклов.

Показано, что такое вычисление отдельно для каждой полусферы Солнца является более целесообразным для более детального понимания поведения солнечной активности. Так, например, для самого мощного 19 солнечного цикла определяющую роль пятнообразования сыграло северное полушарие Солнца. Показано, что в среднем за 12 циклов нарастание числа групп пятен происходило на полгода быстрее в южном солнечном полушарии.

В разделе 2 главы 1 “**Правило Вальдмайера и гипотеза о потерянном солнечном цикле**” описывается методика обобщения и уточнения правила Вальдмайера. Самым долговременным индексом солнечной активности считаются солнечные пятна. Одним из первых в телескоп их наблюдал Галилей в 1610 г., а в 1848 г. Вольф предложил индекс для характеристики солнечной активности - так называемое число Вольфа или относительное цюрихское число солнечных пятен. Он показал, что относительные числа солнечных пятен, точнее, числа Вольфа претерпевают циклические колебания, причём средняя длина этого цикла составляет 11.1 года. Обратное отношение между продолжительностью солнечных циклов и их амплитудой было отмечено очень давно. Это одно из основных свойств 11-летнего цикла, состоящее в том, что с

ростом высоты максимума цикла продолжительность ветви роста убывает. По-видимому, это правило является проявлением нелинейности физических процессов на Солнце. Вальдмайер предложил эмпирическую формулу, которая описывает этот факт. Подтверждается и обобщается подобная зависимость для трёх индексов солнечной активности: чисел Вольфа, групп солнечных пятен и площадей пятен на разных временных шкалах (с 1500 года по 2005 год). В работе используются три индекса солнечной активности:

1) Число Вольфа (W): $W=k(f+10g)$, где f - общее число пятен на видимой полусфере Солнца, g - число групп пятен, k - коэффициент (обычно < 1), учитывающий суммарный вклад условий наблюдений, тип телескопа, и приводящий наблюдаемые величины к стандартным цюрихским числам. Сглаженные числа Вольфа представлены на сайте ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SUNSPOT_NUMBERS.

2) Группы солнечных пятен (GSN ряд- Rg). Этот новый ряд, введённый Хойтом и Шатеном в 1998г., состоит из 455242 наблюдений, произведёнными 463 наблюдателями, т.е. наблюдений на 80% больше, чем во временном ряде чисел Вольфа. Данные по группам солнечных пятен представлены на ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SUNSPOT_NUMBERS/GSN.

3) Суммарные площади солнечных пятен $S(t)$ считаются физически более естественным индексом, связанным с крупномасштабным потоком низкоширотного глобального магнитного поля Солнца. База данных представлена на <http://www.gao.spb.ru/database/esai/>.

Учитывая эти новые индексы солнечной активности, подтверждается и уточняется эмпирическая формула Вальдмайера для разных временных рядов.

В диссертации получены следующие приближения:

- для чисел Вольфа на основе данных о 24 циклах $\tau = 41,5W_M^{-1/2} + 0,3$

- для групп солнечных пятен (17 циклов) $\tau = 27Rg^{-1/2} + 2$

- для площади солнечных пятен (17 циклов) $\tau = 55 S^{-1/2} + 3$

В течение всего времени наблюдений солнечных пятен существуют несколько необычных периодов. Один из таких периодов – минимум Дальтона на стыке XVIII – XIX столетий.

Период 1790–1794 в начале минимума Дальтона был плохо охвачен наблюдениями солнечных пятен. Исходя из этого, Усоскин и др. предложили гипотезу, что один солнечный цикл был потерян в начале минимума Дальтона в течение 1790-ых годов. Авторы гипотезы анализировали данные прямых наблюдений чисел солнечных пятен, которые были очень ненадежны из-за редких наблюдений в течение этого периода времени. Они предположили, что солнечный цикл № 4 по цюрихской нумерации (наиболее продолжительный за последние 300 лет) – фактически суперпозиция двух циклов: нормального цикла 1784-1793, и нового слабого цикла 1793-1800. Мотивировка для введения дополнительного цикла объясняется тем, что тогда разрешается так называемая фазовая катастрофа. Существует правило Гневывшева-Оля, по которому 11 летние циклы солнечной активности объединяют в пары. Оно гласит, что “22-летний цикл начинается чётным циклом относительно малой величины, после которого следует нечётный бóльший цикл, величина которого определяется предыдущим циклом, что указывает на тесную физическую связь между ними”. Ещё в 1948 году Гневывшевым и Олем было отмечено, что хотя пара циклов (№4, №5) нарушает сформулированную зависимость, тем не менее, все пары циклов как до, так и после этой пары циклов, укладываются в найденную ими закономерность. Следовательно, если ввести дополнительный цикл, изменив таким образом нумерацию хода циклов, то правило Гневывшева-Оля сохраняется на протяжении 400 лет.

В диссертации проанализирована гипотеза о потерянном солнечном цикле с точки зрения правила Вальдмайера и показано, что введенный гипотетический цикл заметно нарушает это надежно установленное правило, которое действует с 1500 года для разных индексов солнечной активности. Гипотеза о том, что один солнечный цикл был "потерян" в конце XVIII века (минимум Дальтона),

удаляет чрезвычайно длинный солнечный цикл 4 (его продолжительность была приблизительно 14 лет) и вводит вместо него два более коротких цикла (№4', №5). Эти гипотетические новые циклы (№4', №5) являются также экстремальными, но смещенными в противоположную сторону статистического распределения продолжительностей до 7 лет, тогда как самые вероятные продолжительности солнечных циклов составляют в среднем - приблизительно 10-11 лет.

В главе 2 “Экстремально сильные возмущения” описываются параметры для определения экстремально сильных возмущений, а также методы для их статистического анализа, применённые в работе.

Исследование экстремально сильных возмущений на Солнце, в гелиосфере и магнитосфере представляет большой практический интерес, как для прогнозирования, так и для оценки проявлений космической погоды. Все наиболее сильные гелиосферные и магнитосферные возмущения имеют свои причины на Солнце, которые часто ассоциируются с теми или иными наблюдательными признаками и проявлениями солнечной активности.

Состояние космической погоды в настоящее время оценивается по пятибалльной шкале NOAA (National Oceanic & Atmospheric Administration) по следующим параметрам:

1) рентгеновский балл (R1-R5) - максимальная интенсивность электромагнитного излучения Солнца, измеренного на околоземной орбите в диапазоне мягкого рентгеновского излучения 1 - 12,5 кэВ, на длине волны - 0,1-0,8 нм. Воздействие максимальных интенсивностей приводит к внезапным ионосферным возмущениям, нарушениям радиосвязи. Для работы использовались события, соответствующие баллам R4-R5;

2) солнечные протонные события (S1-S5) - измерение потока протонов на околоземной орбите, в единицах pfu (число протонов, в данном случае с энергией > 10 МэВ через 1 см^2 за 1 с в стерадиане). Воздействия событий баллов S2-S5 приводит к нарушениям радиосвязи на полярных трассах, а также

радиационному риску для космонавтов. Для работы использовались события балла S3-S4, так как события балла S5 пока не наблюдались;

3) геомагнитные бури (G1-G5) – возмущение геомагнитного поля как результат воздействия на магнитосферу потока солнечной плазмы с повышенной плотностью, температурой, скоростью частиц и с южной ориентацией Vz-компоненты межпланетного магнитного поля. Баллы определяются по значениям трёхчасового геомагнитного индекса Kp. В работе используются события баллов G4-G5.

Таким образом, можно было бы определить экстремальные события как большие мощные вспышечные явления, следствием которых в околоземном космическом пространстве является осуществление максимальных возмущений во всех трех позициях, R5, S5, G5. Однако, за весь период наблюдений, начиная со знаменитой кэррингтоновской бури 01.09.1859 г. событий баллов R5, S4 (события с S5 не наблюдались), G5 всего два: август 1972 года и октябрь 2003. Поэтому в данном исследовании событие называется экстремальным, если хотя бы один из параметров R, S, G достигает баллов 4 и 5. В процессе работы над диссертацией была составлена база данных по экстремальным возмущениям, которая насчитывает 85 событий при описанном выше определении с 1859 по 2006 год.

Для получения более продолжительного ряда экстремальных событий проведено сопоставление геомагнитных индексов Aa и Ap и установлена связь между ними с помощью метода наименьших квадратов:

$$Aa=1.7Ap+1.9$$

Дело в том, что Ap-индекс – значение вариации магнитного поля по среднеширотным обсерваториям – вычисляется по индексам Kp, оценки которого ведутся с 1932 года, а Aa-индекс – аналогичен индексу Ap, но вычисляется по данным антиподальных обсерваторий в Гринвиче и Мельбурне, его оценки ведутся с 1867 года. Исходя из этого соотношения, для экстремальных событий (в данном случае сильных геомагнитных бурь) для

раннего периода наблюдений, когда не был введен индекс A_p , можно применять A_a индекс.

Несмотря на то, что статистика экстремальных событий невелика, мы попытались рассмотреть, как ведут себя отобранные 85 событий с точки зрения распределения по баллам RSG. Для этого каждый из параметров R, S, G, можно представить как вектор в обобщенном пространстве событий RSG. Значения параметров RSG рассматриваются как три координаты в этом пространстве. Зафиксировав поочередно значения R, S, G была построена карта плотностей событий в плоскостях SG, RG, RS соответственно для разных баллов фиксированных параметров. Наибольшая плотность для всех рассматриваемых событий находится в правом верхнем углу для каждого параметра (рис.1).

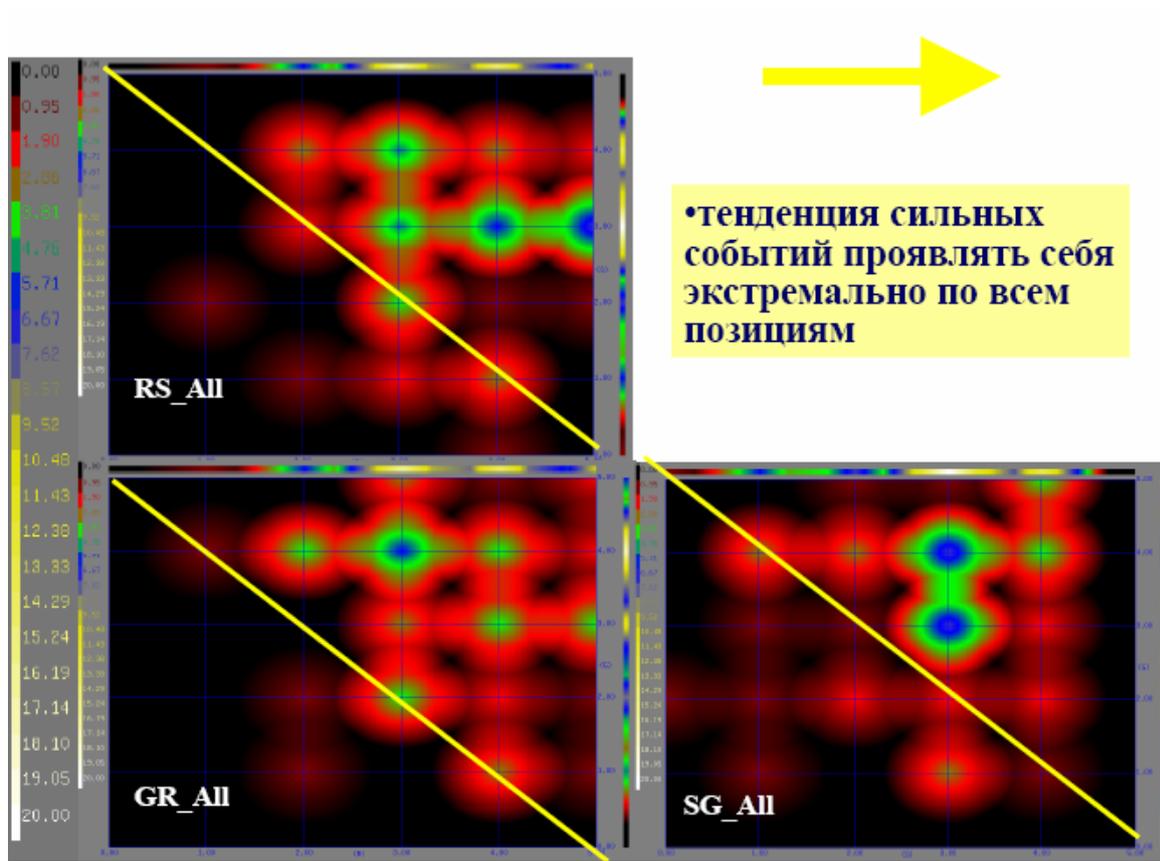


Рис.1 Карты плотности распределения событий для разных баллов фиксированных значений R, S и G соответственно. Сечение "объёма событий" плоскостями S, R, G в обобщенном координатном пространстве: а) график R(S), б) график G(R), д) график S(G).

Это свидетельствует о том, что, несмотря на сложившееся мнение о многообразии вспышек и корональных выбросов массы без их дальнейших проявлений в околоземном пространстве, а также сильных геомагнитных бурь без значимых проявлений на Солнце, статистика таких событий для экстремальных возмущений незначительна. Данное утверждение подтверждается также простым распределением по количеству экстремальных событий для каждого параметра R, S, G, которое демонстрирует статистическое преимущество событий высоких баллов 3-5 над 1 и 2.

Таким образом, несмотря на небольшую статистику экстремальных событий, наблюдается тенденция сильных событий проявлять себя экстремально по всем основным параметрам. Выполненное исследование даёт дополнительные весомые аргументы в пользу статистических принципов прогнозирования, основанных на так называемом “синдроме большой вспышки”. Согласно этому принципу, наибольшие геоэффективные события связаны с наибольшими вспышками.

Это же исследование убедительно показывает, что так называемые “проблемные геомагнитные бури”, то есть возмущения на Земле при отсутствии сильных эрупций на Солнце, не бывают экстремально мощными. Данный вывод принципиально важен для практики. Он развенчивает миф о возможной опасности “проблемных бурь”. В научном плане эти выводы подтверждают современные физические представления о солнечной активности как следствии процессов выделения и диссипации свободной энергии из-под фотосферных источников, рассматриваемых в их единстве с вышележащей динамической солнечной атмосферой.

На спаде последнего 23 его солнечного цикла в 2002-2005 годах на Солнце произошли экстремальные по своей силе возмущения, которые проявились как в гелиосфере и магнитосфере, так и на Земле. Таким образом, стала особенно актуальна проблема, связанная с изучением причин и особенностей таких событий.

В главе 3 “Экстремальные события в 23-м солнечном цикле” даётся детальное описание экстремальных проявлений солнечной активности за период с 1997 по 2004 год на основе новых данных со спутников SOHO, TRACE, КОРОНАС-Ф, ACE и WIND.

Проанализированы солнечные и гелиосферные причины геомагнитных возмущений на фазе роста 23-его солнечного цикла. Проведён комплексный анализ данных о сильных солнечных и гелиосферных возмущениях в 2003–2004 годах. Представлен новый наблюдательный материал о явлениях экстремально высокой активности на Солнце и в гелиосфере, имевших место в 2003г. Эти проявления оказались рекордными по величинам целого ряда параметров. На основе этой информации и сравнения с другими подобными ситуациями, имевшими место в прошлом, а также с использованием имеющихся теоретических представлений, обсуждаются возможные причинно-следственные связи между наблюдаемыми процессами. Проведенное рассмотрение не оставляет сомнений в том, что физические причины солнечных и гелиосферных явлений в октябре–ноябре 2003 г. не являются исключительно локальными и относящимися лишь к активным областям и солнечной атмосфере над ними. Энергетические резервуары и движущие силы этих процессов носят более глобальный характер и во многом скрыты от наблюдателя, поскольку, в конечном счете, их источники лежат в подфотосферных слоях Солнца, где иногда могут происходить и действительно происходят достаточно быстрые, неожиданные и трудно предсказуемые изменения. Солнечные пятна могут служить неплохими трассерами этих внезапных изменений и перестроек на Солнце, хотя можно указать и другие диагностические признаки в параметрах магнитных полей, движений вещества и характеристиках излучений. По целому ряду солнечных и гелиосферных параметров рассматриваемый интервал времени является уникальным за все время наблюдений.

Причиной сильных геомагнитных бурь в октябре–ноябре 2003 года явились порожденные этой нестационарной ситуацией на Солнце корональные

выбросы масс, принесшие с собой быстрые потоки плазмы с достаточно сильными и длительными магнитными полями южной ориентации в гелиосфере.

Проанализирована способность солнечных и межпланетных явлений возбуждать геомагнитные бури на примере отдельных экстремальных событий в октябре-ноябре 2003г. и ноябре 2004г. Выявлено, что для экстремальных возмущений чётко прослеживаются следующие особенности в развитии геомагнитной бури: отрезки времени с отрицательным значением северо-южной составляющей межпланетного магнитного поля приводят к усилению геомагнитного возмущения. Периоды времени с положительным значением этой составляющей приводят к ослаблению возмущения. Таких участков на временном профиле Dst индекса геомагнитной активности для периода 7-12 ноября 2004 насчитывается около десятка. Все эти участки отвечают указанному условию прерывания или приостановки развития геомагнитной бури. Таким образом, был сделан вывод, что можно восстановить по наземным магнитограммам условия в межпланетной среде, когда они были недоступны для наблюдений.

Выявлены и исследованы проявления глобальной асимметрии Солнца в исследуемый промежуток времени, обусловленные процессами в его недрах и видимые в солнечной атмосфере и гелиосфере благодаря вращению Солнца как частично повторяющиеся рекуррентные события. В октябре-ноябре 2003 года имели место глобальные изменения яркости во всех спектральных диапазонах электромагнитного излучения Солнца, носившие асимметричный характер по гелиодолготе. Явление сопровождалось рекордными по своей силе процессами выделения энергии в виде корональных выбросов массы и солнечных вспышек, причем наиболее мощные из них произошли на той стороне Солнца, которая и без того имела в целом повышенную яркость и повышенный контраст отдельных элементов в виде активных областей и корональных дыр. В параметрах излучения солнечной атмосферы, потоков плазмы солнечного ветра

и гелиосферного магнитного поля прослеживается связанная с этим картина в виде суперпозиции коротирующих и спорадических возмущений, частично скореллированных между собой.

В заключении сформулированы **основные результаты и выводы работы**, приводимые ниже.

Основные результаты и выводы работы

1. Уточнены моменты времени для минимумов циклов солнечной активности на основе данных о распределении солнечных пятен по широте отдельно для северной и южной полусфер Солнца за 12 последних циклов. Показано, что в среднем за 12 циклов нарастание числа групп пятен происходило на полгода быстрее в южном солнечном полушарии.
2. Правило Вальдмайера обобщено с учётом новых последних циклов для чисел Вольфа. Проверено, что это правило справедливо и для других индексов солнечной активности. Показано, что гипотеза о потерянном солнечном цикле противоречит установленному правилу.
3. Впервые выполнен статистический анализ экстремальных возмущений солнечной активности по совокупности трёх основных параметров, широко используемых в научных и прикладных задачах. Составлена база данных по экстремальным возмущениям, которая насчитывает 85 событий за период с 1859 по 2006 года и на этой основе сделан вывод, о том, несмотря на то, что статистика мала, наблюдается тенденция сильных событий проявлять себя экстремально по всем позициям.
4. На примере событий 23-го солнечного цикла, который, благодаря новым космическим исследованиям, является наиболее репрезентативным, сделан вывод, что большое физическое разнообразие экстремальных событий не сводится к каким-либо универсальным сценариям. На примере 2003 года показано, что возрастание солнечной активности в такие периоды носит не только локальный характер, но и является глобальным.

5. Выполненное исследование экстремально сильных возмущений даёт дополнительные весомые аргументы в пользу статистических принципов прогнозирования, основанных на так называемом “синдроме большой вспышки”. Согласно этому принципу, наибольшие геоэффективные события связаны с наибольшими вспышками. Это же исследование убедительно показывает, что так называемые “проблемные геомагнитные бури”, то есть возмущения на Земле при отсутствии сильных эрупций на Солнце, не бывают экстремально мощными. Данный вывод принципиально важен для практики.

Список публикаций автора по теме диссертации

1. *В. Ботмер, И.С. Веселовский, А.В. Дмитриев, А.Н. Жуков, П. Кэргилл, Е.П. Ромашец, О.С. Яковчук, Солнечные и гелиосферные причины геомагнитных возмущений на фазе роста 23 солнечного цикла.* // *Астрономический вестник.* **36(6)**, 539-547, 2002.
2. *O. Panasenco, I.S. Veselovsky, A.V. Dmitriev, A.N. Zhukov, O.S. Yakovchouk, I.A. Zhitnik, A.P. Ignat'ev, S.V. Kuzin, A.A. Pertsov, V.A. Slemzin, S.I. Boldyrev, E.P. Romashets, A. Stepanov, O.I. Bugaenco, V. Bothmer, S. Koutchmy, A. Adjabshirizadeh, Z. Fazel, S. Sobhanian, Solar origins of intense geomagnetic storms in 2002 as seen by the CORONAS-F satellite.* // *Adv. Space Res.* **36(8)**, 1595-1603, 2005.
3. *I.S. Veselovsky, V. Bothmer, P. Cargill, A.V. Dmitriev, K.G. Ivanov, E. Romashets, A.N. Zhukov, and O.S. Yakovchouk, Magnetic storm cessation during sustained northward IMF.* // *Adv. Space Res.* **36 (12)**, 2460-2464, doi:10.1016/j.asr.2004.06.020., 2005.

4. *И.С. Веселовский, А.В. Дмитриев, И.А. Житник, А.Н. Жуков, М.А. Зельдович, С.В. Кузин, А.А. Наумкин, И.Г. Персианцев, А.Ю. Рязанов, Ю.С. Шугай, О.С. Яковчук, С.А. Богачев, С.В. Шестов. Глобальные изменения и асимметрия Солнца в период экстремально высокой активности в октябре-ноябре 2003 г. // Астрономический вестник 39 (3), 195-201, 2005 (English translation: I.S. Veselovsky, Global Variations and Asymmetry of the Sun During Extremely High Activity in October November 2003, Solar System Research, 39, Issue 3, 169-175, 2005).*
5. *И.С. Веселовский, М.И. Панасюк, С.И. Авдюшин, Г.А. Базилевская, А.В. Белов, С.А. Богачев, В.М. Богод, А.В. Богомолов, Ф. Ботмер, К.А. Боярчук, О.И. Бугаенк., Э.В. Ващенко, В.И. Власов, А.А. Гнездилов, Р.В. Горгуца, В.В. Гречнев, Ю.И. Денисов, А.В. Дмитриев, М. Драйер, Ю.И.Ермолаев, Е.А. Ерошенко, И.А. Житник, А.Н. Жуков, Г.Н. Застенкер, Л.М. Зеленый, М.А. Зельдович, Г.С. Иванов-Холодный, А.П. Игнатъев, В.Н. Ишков, О.П. Коломийцев, И.В. Крашенинников, К. Кудела, Б.М. Кузевский, С.В. Кузин, В.Д. Кузнецов, С.Н. Кузнецов, В.Г. Курт, Л.Л. Лазутин, Л.Н. Лещенко, М.Л. Литвак, Ю.И. Логачев, Г. Лоуренс, А.К. Маркеев, В.С. Махматов, А.В. Митрофанов, И.Г. Митрофанов, О.В. Морозов, И.Н. Мягкова, А.А. Нусинов, С.Н. Опарин, О.А. Панасенко, А.А. Перцов, А.А.Петрукович, А.Н. Подорольский, Е.П. Ромашец, С.И. Свертилов, П.М. Свидский, А.К. Свиржевская, Н.С. Свиржевский, В.А. Слемзин, З. Смит, И.И. Собельман, Д.Е. Соболев, Ю.И. Стожков, А.В. Суворова, Н.К. Суходрев, И.П. Тиндо, С.Х. Тохчукова, В.В. Фомичев, И.В. Чашей, И.М. Черток, В.И. Шишов, Б.Ю. Юшков, О.С. Яковчук, В.Г. Янке Солнечные и гелиосферные явления в октябре-ноябре 2003 г.: причины и следствия // Космические исследования, 42 (5), 453-508, 2004 (English translation: I.S.Veselovsky, Solar and heliospheric phenomena in October-November 2003: causes and effects, Cosmic Res., 42(5), 435-488, 2004).*

6. Ю.И. Ермолаев, Л.М. Зеленый, Г.Н. Застенкер, А.А. Петрукович, М.Ю. Ермолаев, Н.С. Николаева, М.И. Панасюк, С.Н. Кузнецов, И.Н. Мягкова, Е.А. Муравьева, Б.Ю. Юшков, И.С. Веселовский, А.В. Дмитриев, А.Н. Жуков, О.С. Яковчук, В.Д. Кузнецов, И.М. Черток, В.Н. Ишков, А.В. Белов, Е.А. Ерошенко, В. Г. Янке, С.П. Гайдаш, Х.Д. Канониди, С.В. Кузин, И.А. Житник, А.П. Игнатъев, В.А. Слемзин, Н.К. Суходрев, С.А. Шестов, М.В. Еселевич, В.Г. Еселевич, Г.В. Руденко, В.М. Дворников, В.Е. Сдобнов, М.В. Кравцова, В.М. Богод, В.С. Котельников, Л.А. Першаков, М.И. Белоглазов, В.И. Власов, И.В. Чашей, Н.Г. Клейменова, О.В. Козырева, В.И. Козлов, В.А. Пархомов, Ю.А. Кугаенко, Р.З. Хисамов, В.Л. Янчуковский, К. Кудела, **Год спустя: Солнечные, гелиосферные и магнитосферные возмущения в ноябре 2004г.** // Геомагнетизм и Аэрономия, 6, 723-763, 2005.
7. Ф. Ботмер, И.С. Веселовский, А.В. Дмитриев, А.Н. Жуков, П. Каргилл, О. Панасенко, Е.П. Ромашец, О.С. Яковчук, **Солнечные и гелиосферные причины геомагнитных возмущений в 2002 году.** // Изв. КрАО. 100, 203, 2004.
8. И.С. Веселовский, О.С. Яковчук, **Некоторые физические особенности возмущений на Солнце и в гелиосфере** // “IX Пулковская международная конференция по физике Солнца: Солнечная активность, как фактор космической погоды.” Санкт-Петербург, 4-9 июля 2005 г., Труды, 303-308, 2005.
9. О.С. Яковчук, И.С. Веселовский, **Правило Вальдмайера и гипотеза о “потерянном” солнечном цикле в минимуме Дальтона.** // “X Пулковская международная конференция по физике Солнца: Квазипериодические процессы на Солнце и их геоэффективные проявления”, Санкт-Петербург. 6-8 сентября 2006, Труды, 155-162, 2006.

Работа поступила в ОНТИ апрель 2007 г.
Цифровая печать. Тираж 100 экз.
Заказ №

Отпечатано в типографии КДУ
Тел. (495) 939-40-36. E-mail: press@kdu.ru