

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ФИЗИКЕ СОЛНЦА И СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫМ СВЯЗЯМ

В. В. Фомичев, В. Н. Обридко, Б. П. Филиппов

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н. В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН)

В настоящей статье кратко излагаются результаты исследований по физике Солнца и солнечно-земным связям, полученные в ИЗМИРАН за последние 25 лет. В частности, большое внимание было уделено изучению динамики магнитных полей Солнца различных пространственных масштабов, проявлений солнечной активности в различных участках спектра электромагнитных волн (в ультрафиолетовом, рентгеновском и радиодиапазонах), их связи с геофизическими явлениями, характеристик солнечного ветра и их вариаций в ходе солнечного цикла.

Ключевые слова: солнечная активность, магнитные поля, солнечные вспышки, корональные выбросы массы, солнечный ветер.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования последних десятилетий показали, что условия нашего существования на Земле от сугубо биологических аспектов до прямого функционирования глобальных технологических систем самым тесным образом связаны с непрерывно меняющимися параметрами окружающего космического пространства. В настоящее время общепризнанно, что основным источником энергии и возмущений, распространяющихся к Земле сквозь межпланетную среду и определяющих состояние околоземной космической оболочки является Солнце. Поэтому анализ физических процессов в солнечной атмосфере, приводящих к мощным энерговыделениям в виде электромагнитного излучения, ускоренных частиц и крупномасштабных магнитогидродинамических (МГД) возмущений (корональных выбросов массы) имеет большое значение для исследования солнечно-земной системы и физических процессов, протекающих в ней. Не менее важной является и задача разработки методов прогнозирования поведения этой системы с целью предотвращения или уменьшения отрицательных эффектов воздействия солнечной и обусловленной ею геофизической активности на жизнь и деятельность человека на Земле.

История и результаты гелиофизических исследований, а также исследований по солнечно-земной физике в ИЗМИРАН за первые 50 лет описаны в сборнике [Иванов-Холодный и др., 1989; Могилевский, Фомичев, 1989]. В настоящей статье кратко излагаются результаты, полученные за последующий период.

Фомичев Валерий Викторович — заместитель директора, доктор физико-математических наук, fomichev@izmiran.ru

Обридко Владимир Нухимович — заведующий отделом, доктор физико-математических наук, профессор, obridko@izmiran.ru

Филиппов Борис Петрович — заведующий лабораторией, доктор физико-математических наук

Несмотря на хорошо известные трудности нашей науки, после распада СССР, период с 1989 по 2013 г., тем не менее, оказался очень плодотворным для получения учёными ИЗМИРАН принципиально новых результатов в области развития новых методов диагностики и прогнозирования явлений солнечно-земной физики. В ИЗМИРАН в течение многих лет ведутся комплексные исследования в этом направлении на существующей экспериментальной базе как наземных (Большой солнечный телескоп с вектор-магнитографом, единственные в России радиоспектрографы метрового диапазона, Большой внезатменный коронограф), так и космических («КОРОНАС-Ф» (Комплексные Орбитальные Околоземные Наблюдения Активности Солнца), SOHO (Solar and Heliospheric Observer) и др.) наблюдений.

К тому же, в последние десятилетия бурное развитие получили наблюдения Солнца с космических аппаратов (КА), и был реализован и продолжится в настоящее время ряд крупных космических проектов (например, SOHO, STEREO, SDO (Solar Dynamics Observatory), RHESSI (Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager), Hinode и др.). В таких условиях появились возможности для более комплексного анализа солнечной активности (СА) и её влияния на состояния околоземного космического пространства. В частности, в ИЗМИРАН большое внимание было уделено изучению динамики магнитных полей Солнца различных пространственных масштабов, проявлений солнечной активности в различных участках спектра электромагнитных волн (в частности, в ультрафиолетовом (УФ), рентгеновском и радиодиапазонах) и их связи с геофизическими явлениями, характеристик солнечного ветра и их вариации в ходе солнечного цикла.

1. ГЛОБАЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

1.1. Концепция приоритета крупномасштабных полей

В основе описания глобальной организации солнечной активности лежит представление о приоритете крупномасштабных магнитных полей. Это представление возникло в начале 60-х гг. прошлого века, когда было показано, что активные области (АО) концентрируются к границам секторной структуры (ссылка). Этот результат в дальнейшем неоднократно проверялся и модифицировался. При этом обнаружили связи этого явления с проблемами активных долгот на Солнце, характеристиками вращения и гелиосейсмологическими результатами.

В современном виде концепция выглядит следующим образом. На Солнце сосуществуют две системы — глобальные магнитные поля и поля активных областей (локальные поля). На самом деле существуют не две, а три системы. Отдельно следует рассматривать ещё тонкоструктурные элементы фонового магнитного поля, но обсуждение их роли мы пока отложим.

Глубинное динамо создаёт глобальное магнитное поле, которое всплывая, определяют всю структуру поля на поверхности. Механизм дальнейшей концентрации поля и появления активных областей пока ясен не до конца. Однако определёнno ясно, что положение активных областей и их мощность связаны с пространственными характеристиками глобального поля.

Таким образом, солнечный цикл можно описать как сложное взаимодействие двух систем полей: глобального (крупномасштабного) и локального. Такой подход в целом согласуется с традиционной схемой динамо эффекта. Совокупность этих индексов характеризующих эти две системы составляют «паспорт» основных опорных точек цикла, позволяющий отождествить их с высокой точностью.

Глобальное поле можно описать, как совокупность мультиполей. Главная составляющая — это эффективный солнечный диполь. Оказалось, что во время минимума 11-летнего цикла полюс эффективного солнечного диполя описывает довольно регулярные перемещения относительно полюса вращения, напоминающие прецессию. За время минимума диполь обходит вокруг полюса вращения, делая один или два оборота. Эта квазипрецессия продолжается от 1 до 3 лет. Затем происходит довольно резкий перескок в экваториальную область. Время этого перескока составляет 0,7...1,2 года. Далее диполь продолжает уже в приэкваториальной области плавное движение вдоль долготы в течение 1,5...3 лет. Затем происходит новый перескок, и прецессия продолжается уже у противоположного полюса. Очень важным для понимания физики солнечного динамо оказался тот факт, что магнитный момент солнечного диполя в период переполусовок не обращается в нуль, а просто меняет свою ориентацию. Величина магнитного момента в период переполусовки уменьшается всего лишь в 2-3 раза [Лившиц, Обридко, 2006].

Взаимодействие двух систем полей приводит к тому, что эффективный магнитный экватор Солнца не совпадает с гелиографическим, а представляет собой некую волнистую линию. Его продолжение в гелиосфере называется гелиосферным токовым слоем и напоминает юбку балерины. Из анализа данных по гелиосферному магнитному полю обнаружилось, что в период минимума эта «юбка» несколько приспускается «вниз» к южному полюсу. Этот эффект К. Мурсула назвал эффектом «стыдливой балерины» (*Bashful Ballerina*). Выполненные нами расчёты непосредственно по магнитному полю Солнца показали, что центр тяжести гелиосферного экватора испытывает квазипериодические колебания. В период минимума 11-летнего цикла он несколько смещён к югу (эффект *Bashful Ballerina*). Однако в максимуме цикла это смещение меняется на обратное. Это определяется влиянием квадрупольной составляющей глобального поля. Дополнительно обнаружилось, что растр (tilt) испытывает и более короткопериодические колебания с периодом 1,3 года. Анализ данных на большом временном интервале 1915–2005 гг. показал, что колебания с периодом 1,3 года устойчиво присутствуют на фазе роста и пропадают на фазе спада [Obriдко, Shelting, 2007].

1.2. Активные долготы

Активные долготы были впервые обнаружены в 1897 г. А. Вольфером, но до сих пор остаются предметом оживлённых дискуссий. Следует отметить, что само понятие активных долгот без указания, к какому индексу они относятся, является понятием в значительной степени неопределённым.

Очевидно, что активные долготы для пятен отличаются от активных долгот для корональных дыр (КД).

По данным о солнечных пятнах Гринвичской обсерватории за 1879–2003 гг. (12–23-й циклы) выделены четыре активные долготы, соответствующие в среднем кэррингтоновским долготам ~ 0 , ~ 90 , ~ 180 , $\sim 270^\circ$. В течение всего времени жизни зоны интенсивного пятнообразования вращаются как твёрдотельные образования, что свидетельствует о том, что их источник лежит в основании конвективной зоны. При этом, как правило, одновременно наблюдается лишь пара антиподальных активных долгот, отстоящих друг от друга на $\sim 180^\circ$ (на гелиодолготах ~ 90 и $\sim 270^\circ$ или ~ 180 и $\sim 0^\circ$), хотя в течение некоторого времени могут одновременно существовать и 3 или очень редко даже все четыре активные долготы. В каждом из четырёх секторов активных долгот выявлены квазидвухлетние вариации со средними периодами ~ 30 оборотов ($\sim 2,4$ года), изменяющимися во времени в интервале от 20 до 40 оборотов (от $\sim 1,5$ до 3 лет). Распределение зон интенсивного пятнообразования (активных долгот) меняется практически одновременно на всех гелиодолготах через каждые 1,5...2 года, что, по-видимому, свидетельствует об их связи с квазидвухлетними вариациями крупномасштабного магнитного поля, определяющего локализацию и характер поведения активных долгот.

Показано, что солнечные пятна в зонах пятнообразования появляются в виде кластеров, имеющих общий источник — зону пятнообразования, продолжительность жизни которой значительно превышает время жизни отдельных пятен. Выявлено, что все зоны пятнообразования независимо от гелиошироты их образования и фазы цикла вращаются с одним и тем же кэррингтоновским периодом $T = 27,2753$ дня. Это свидетельствует о том, что зона генерации солнечных пятен расположена в жёстко вращающемся слое, который согласно современным гелиосейсмологическим исследованиям находится в основании конвективной зоны. В то же время последовательно образующиеся зоны пятнообразования (особенно для небольших и короткоживущих пятен) выявляют дрейф их местоположения по гелиодолготе, свидетельствующий, что источник, инициирующий генерацию солнечных пятен, вращается быстрее зоны пятнообразования с синодическим периодом $T \approx 26,8...26,9$ дней. Таким образом, генерация пятен в жёстко вращающемся слое происходит под действием некоторого инициирующего агента, находящегося в другом более быстро вращающемся слое. В качестве такого агента могут выступать или динамо волна, распространяющаяся из зоны средних широт к экватору, или глобальное магнитное поле, вмороженное в поток обратной ветви меридиональной циркуляции в основании конвективной зоны [Ivanov, 2003].

Поскольку явление активных долгот несомненно является следствием взаимодействия глобального (возможно полоидального) и асимметричного (квадрупольеподобного) полей оказалось естественным связать положение групп пятен не с традиционной кэррингтоновской системой координат, а с положением глобального магнитного диполя. Собственно «активные долготы» в кэррингтоновской системе — это не совсем точный термин. Они не постоянны ни во времени, ни в пространстве и тесно связаны со структурой крупномасштабного поля. В гелиомагнитной системе координат они

выражены гораздо лучше. Постепенно смещение оси магнитного диполя объясняет неустойчивость кэррингтоновских активных долгот. Поскольку диполь постепенно меняет своё положение в теле Солнца, но примерно через 18...20 лет (т.е. через один хейловский цикл) возвращается в прежнее положение, это объясняет как неустойчивость кэррингтоновских активных долгот, так и их регулярное восстановление [Obridko et al., 2011].

1.3. Дифференциальное вращение и меридиональная циркуляция

Традиционное представление о независимости дифференциального вращения Солнца от времени оказалось тоже неверным. На временном интервале 1874–2010 гг. было рассмотрено вращение Солнца как звезды. Для расчётов использовалась суммарная площадь всех пятен, наблюдавшихся на видимой полусфере Солнца в данный день. В результате периодограммного анализа получено, что период вращения Солнца изменяется со временем. Наиболее выраженными являются уменьшение периода вращения Солнца (т.е. увеличение скорости) в 1925–1950 гг. В интервалах 1900, 1960 и 1980 гг. наблюдалось увеличение периода вращения. Подобное изменение скорости вращения найдено ранее [Obridko, Shelting, 2001] по магнитным полям на поверхности источника. В этот же временной интервал обнаружено увеличение доли тени в общей площади группы пятен [Bludova et al., 2014].

Дифференциальное вращение короны Солнца может быть представлено в виде суммы двух мод, быстрой и медленной. Быстрая мода слабо дифференциальная, её синодический период равен примерно 27 дням вблизи экватора. Наиболее отчётливо эта мода выражена на фазе спада активности. Медленная мода имеет средний синодический период 31 день. Она заметно проявляется только в высоких широтах на фазе роста активности. Суперпозиция двух мод приводит к изменению характера наблюдаемой широтной зависимости скорости дифференциального вращения короны от фазы цикла. На фазе спада активности дифференциальное вращение слабо выражено, вращение короны близко к твёрдотельному. Более высокая степень дифференциальности проявляется на фазе роста и иногда захватывает фазу максимума [Бадалян и др., 2005, 2006].

Суперпозиция двух мод приводит к изменению характера наблюдаемой широтной зависимости скорости дифференциального вращения короны от фазы цикла. На фазе спада активности дифференциальное вращение слабо выражено, вращение короны близко к твердотельному. Более высокая степень дифференциальности проявляется на фазе роста и иногда захватывает фазу максимума.

Проведён анализ хромосферной активности более 1000 звёзд, зарегистрированной при выполнении программ поиска планет на самых больших телескопах. Хромосферная активность Солнца оказалась несколько выше, чем у основной массы вновь изученных звёзд. Оказалось, что по характеру вращения всей короны Солнце близко к звёздам, циклы на которых ещё не успели установиться. Продолжен анализ эволюции активности Солнца на больших временных шкалах. Существуют звёзды с хромосферой, похожей

на солнечную, но с коронами, мягкое рентгеновское излучение которых на 1–3 порядка превышает соответствующее значение в максимум солнечного цикла. Включение в этот анализ группы более молодых звёзд с повышенным содержанием лития в их атмосферах, по-видимому, позволяет сделать вывод о существовании двух путей эволюции активности солнечного типа [Кацова, Лившиц, 2011; Bochkaev et al., 2011].

В генерации 22-летнего цикла солнечных магнитных полей одну из основных ролей играет меридиональная циркуляция полей и вещества в конвективной зоне Солнца. Длительность дрейфа крупномасштабных магнитных полей от экватора к полюсам в верхней части конвективной зоны составляет 16...17 лет. В этой части конвективной зоны кинетическая энергия меридионального потока вещества существенно превышает энергию диффузных крупномасштабных магнитных полей, так что последние увлекаются меридиональным потоком вещества к полюсам. Обратный дрейф магнитных полей в основании конвективной зоны проявляется на высоких широтах как смещение максимума коэффициента корреляции между вариациями магнитных полей на экваторе и более высоких широтах от полюса в область средних широт (45° ... 60°) за 5...5,5 лет, и от средних широт (45° ... 60°) к экватору в виде дрейфа радиальной компоненты КМПС (крупномасштабного магнитного поля Солнца) (области генерации локальных полей) за 11...12 лет. В нижней части конвективной зоны, где согласно современным моделям динамо и генерируется магнитное поле, начиная с области средних широт (45° – 60°) энергия магнитных полей значительно превышает кинетическую энергию обратного потока вещества. При этом средняя скорость динамо-волны составляет ~ 2 ...3 м/с и равна скорости дрейфа КМПС к полюсам в верхней части конвективной зоны. Показано также, что наряду с петлёй меридиональной циркуляции, ответственной за генерацию 22-летнего магнитного цикла, возможно, существует и другая петля меридиональной циркуляции в области средних широт со значительно большей скоростью циркуляции ~ 15 ...20 м/с и периодом ~ 5 ...6 лет, ответственная за квазидвухлетние магнитные вариации [Обридко, Шельтинг, 2003; Ivanov, Obriadko, 2003; Ivanov, et al., 2003].

1.4. Связь глобальных и локальных полей

Классический закон Хейла правилен только для локальных полей и не учитывает структуру крупномасштабных полей. Был сформулирован обобщённый закон полярностей Хейла, который ранее был сформулирован только для магнитных полей солнечных пятен. В нечётном цикле в северной полушере области с полем, направленным к западу, в среднем занимают площадь меньшую, чем области с полем направленным к востоку. В то же время напряжённость поля с силовыми линиями, направленными к западу (что соответствует N-полярности головного пятна в N-полушере нечётного цикла) в среднем выше, чем напряжённость полей восточного направления. В другом полушарии и с изменением чётности цикла закономерность меняется на обратную. В таком виде закон полярностей применим для полей любых масштабов [Обридко, Шельтинг, 2007].

Вариацию солнечной активности нельзя рассматривать просто как изменение числа солнечных групп. Структура группы пятен со временем меняется. В качестве индекса структуры была выбрана относительная доля тени внутри пятна. Наибольших значений этот параметр достигает в начале 30-х гг. прошлого века. Это повышение величины совпадает с тем периодом, когда в общей популяции пятен повышается число относительно малых пятен. Примерно в это же время наблюдается замедление вращения Солнца.

Показано, что средние магнитные поля крупных пятен демонстрируют циклические изменения, а мелких — имеют тенденцию к более длительным вариациям. Это обстоятельство свидетельствует о возможном наступлении в ближайшее десятилетие глубокого минимума солнечной активности.

1.5. Фоновые поля и их тонкая структура

На большинстве современных магнитограмм высокого разрешения (SOHO/MDI, SOLIS) магнитное поле представляется в виде совокупности очень малых образований. Эта филаментарная структура предсказывалась давно, и её прямое обнаружение сегодня является, несомненно, большим достижением экспериментальной солнечной физики. Кластерная модель солнечного пятна подтверждается данными гелиосейсмологии, и это имеет глубокие следствия для теории генерации магнитного поля на Солнце.

Однако несколько неожиданно стали менее ясными свойства крупномасштабного фонового поля. Начнём с того, что сам факт его существования не очевиден. Есть соображения, согласно которым поле между так называемыми «килогауссовыми» трубками вообще отсутствует. При этом остаётся неясным, почему тогда существуют очень протяжённые области, где явно преобладают поля одного знака. Наиболее естественным при этом является существование крупномасштабного глобального поля, которое собирает более мелкие по масштабу (но более сильные по напряжённости) локальные поля в единую крупномасштабную структуру. Как энергетические, так гидродинамические стороны этого процесса остаются по существу нерешёнными. Мы не знаем сегодня, являются ли эти фоновые поля первичными или возникают при распаде локальных полей. Неясно также насколько глубоко внутрь проникают эти поля, т. е. являются ли они крупномасштабными по всем координатам, или только по поверхности. С математической точки зрения методы экстраполяции поля в верхнюю корону не различают эти два случая. Ситуация осложняется ещё и тем, что многие свойства фоновых полей неясны и даже загадочны до сих пор, кроме того, необходимо различать понятия фоновых и глобальных полей, что часто весьма не просто. Ещё одна интересная особенность выявилась в самое последнее время при анализе наблюдений с высоким разрешением на магнитографе SOHO/MDI. Казалось бы, фоновое поле, которое по определению находится за пределами локальных полей, должно быть квазиоднородным. На самом деле оно само состоит из мелких элементов. Эту однородность можно представить себе как галечный пляж, с которого убран весь мусор.

Вторая особенность этой структуры состоит в том, что поле в этих элементах практически горизонтальное. Вариация центр-край для всего фонового поля является положительной, т.е. наблюдаемые значения падают к лимбу, как это и должно быть для квазирадимального поля. Для наиболее слабых полей, которые мы относим к мелкомасштабным элементам фонового поля, вариация отрицательная, что указывает на преимущественную трансверсальность этих полей. Похожий результат был получен при самых первых измерениях полного вектора за пределами активных областей, но был интерпретирован как следствие низкой чувствительности магнитографов по поперечному полю. Теперь можно утверждать, что трансверсальность полей в малых элементах фонового поля является надёжно установленным фактом и элементы фонового поля напоминают «вывал леса в тайге».

Таким образом мелкомасштабные фоновые относительно слабые магнитные поля образуют особую популяцию, которая имеет свои особые законы циклической вариации. Заметим, что на самом деле эти вкрапления могут представлять собой вкрапления относительно сильного поля. Переполусовка происходит именно путём вытеснения мелких элементов одной полярности элементами другой полярности [Obridko et al., 2014].

1.6. Фрактально-кластерная структура солнечной магнитоплазмы

Концепцию фрактальных свойств магнитных полей на Солнце много лет развивал Э.И. Могилевский. Концепция была подытожена в его монографии [Могилевский, 2001]. Основные аргументы, говорящие о фрактально-кластерной структуре солнечной активности, состоят в следующем: а) наблюдаемая супердиффузия магнитного поля; б) дискретность размеров явлений солнечной активности; в) характерная для фракталов функция пространственного распределения; г) показательный закон для частоты появления явлений СА.

Тонкая структура (~ 10 угл.с) стохастических свойств магнитного поля Солнца анализирована в рамках двумерной модели фрактального броуновского процесса (средний квадрат разности амплитуд поля в двух точках, разделённых расстоянием D пропорционален D^{2H}). Стандартное отклонение s магнитного поля и показатель H , соответствующий различным уровням модуля B , определены при помощи использования оцифрованных солнечных магнитограмм с разрешением 2 угл.с. Установлено, что переход от фонового магнитного поля к полю активной области происходит в диапазоне 25...50 Гс. При этом значение H для фонового поля значительно меньше, чем для полей активной области.

Для анализа фрактальных свойств пространственного распределения магнитного поля солнечной поверхности использовались магнитные данные всего диска, полученные на SOHO/MDI. Применён метод, разработанный Higuchi для анализа временных последовательностей. Показано, что распределение продольного магнитного поля в спокойных областях характеризуется фрактальной размерностью 1,43, тогда как в областях сильной

концентрации поля это число опускалось до 1,1. Обнаруживается антикорреляция между фрактальной размерностью и средним значением абсолютного значения магнитного поля исследуемых сканов

По данным спектромагнитографа ИЗМИРАН и Центра космических исследований имени Маршалла (Marshall Space Flight Center — MSFC) обнаружено, что существуют два семейства самоподобных силовых линий, одно из которых относится к области тени пятна и внутренней полутени, другое — к области внешней полутени и фотосферы. Были исследованы также особенности магнитной структуры пятен в рамках фрактальной модели пятна (фрактальные числа Хаусдорфа). Показано, что фрактальные числа растут с ростом магнитной напряжённости. Наибольшее значение, близкое к 1,5, соответствует значениям продольного магнитного поля в интервале 1200...1400 Гс, т.е. области перехода от тени к полутени. Второй, меньший, максимум соответствует границе полутень-фотосфера. Полученные результаты свидетельствуют, возможно, о наличии токовой системы в области перехода от тени к полутени или об изменении токовых систем, связанных с этими областями [Ioshpa et al., 2006].

В дальнейшем фрактальный анализ магнитного поля солнечных пятен, включающий окружающую активную область, показал, что существуют не два, а три семейства самоподобных контуров магнитного поля, приблизительно соответствующих областям тени, полутени и окружающей солнечное пятно фотосферы. Наибольшее фрактальное число соответствует области слабых магнитных полей (близлежащей к пятну фотосфере), наименьшее — полутени. Более детальное рассмотрение показывает, что фрактальный коэффициент имеет максимум ($\sim 1,5$) вблизи перехода от тени к полутени. Зависимости фрактальных чисел пространственных распределений продольных и поперечных полей по поверхности Солнца подобны по своему характеру, но значения для поперечных полей выше соответствующих значений для продольных полей примерно в 1,5 раза. Этот результат отражает, несомненно, тот факт, что поперечные поля распределены по солнечной поверхности существенно хаотичней, нежели продольные. Установлена тесная связь глобальных фрактальных индексов пространственного распределения магнитного поля по солнечной поверхности со средними значениями абсолютных величин продольного магнитного поля на этих поверхностях. Фрактальные числа максимальны и близки к 2,0 (значению, характерному для белого шума) для спокойных областей Солнца и уменьшаются до 1,1...1,2 для активных областей. [Ioshpa et al., 2007].

Продолжалось исследование фрактально-кластерной структуры солнечных вспышек в короне и критический анализ трудностей в «стандартной» модели вспышек с магнитным пересоединением. Обосновано существование вспышки во фрактально-кластерной модели в короне при наличии идущего с фотосферного уровня потока МГД-солитонов. Используется характерный для фрактальной среды эффект самоорганизованной критичности. Рассмотрена возможная солитонная модель энергопереносов вспышки. Показано, что вспышка — это поток магнитопересоединяющихся микровспышек на фрактальных элементах («блинкеры»). Блинкеры (фракталы) образуются в турбулентной нелинейной среде в солнечной

магнитоплазме переходной и корональной областей при решении нелинейного уравнения Син-Гордон. Численные оценки энергии солитонов (потока блинкерсов-фракталов) соответствуют энергии вспышек. Рассмотрен процесс возникновения самоорганизованной критичности (СОК) в АО короны, как предвспышечной стадии с последующим сбросом энергии в виде потока фракталов с реализацией энергии при микровспышках (элементарные магнитные пересоединения). [Mogilevsky et al., 2005].

1.7. Асимметрия активности Солнца

В последние годы усилился интерес к довольно неоднозначному явлению. — северо-южной асимметрии солнечной активности. Эта асимметрия является квазипериодической величиной со средним периодом 12 лет. Она ведёт себя сходным образом в различных индексах солнечной активности от фотосферы до короны. Во временном ходе асимметрии отчётливо выражаются квазидвухлетние колебания (QBO), которые значительно лучше выражены в асимметрии, чем в самих индексах активности. Оказалось, что наблюдается хорошо выраженная антикорреляция между мощностью квазидвухлетних вариаций и абсолютной величиной северо-южной асимметрии. По-видимому, существует единый механизм возникновения северо-южной асимметрии, при котором проявляется как разбалансировка полушарий по мощности (асимметрия площадей пятен), так и по пространству (асимметрия широтного положения центров пятнообразования).

Появление значительной южной асимметрии в начале XXI в. подчёркивает сходство цикла 23-го с циклом 13-м конца XIX — начала XX в. Сильное доминирование южного полушария в эти временные интервалы о наступлении периода малых циклов активности. Однако возникновение глубокого минимума типа минимума Маундера представляется маловероятным.

В целом, северо-южную асимметрию можно интерпретировать как разбалансировку в работе двух полушарий. Наблюдаемая разбалансировка наиболее выражена в минимумах циклов, при постепенном переходе от одного цикла к другому. В рамках современной динамо-теории существенным является вопрос, насколько синхронизованы процессы, происходящие в северном и южном полушарии. Можно полагать, что N-S асимметрия свидетельствуют о различии характеристик активности в двух полушариях в ходе 11-летнего и векового циклов активности [Бадалян, 2012; Badalyan, Obridko, 2011].

1.8. Исследование корональных дыр

Предложена новая концепция Глобальных комплексов активности, заключающаяся в объединении в рамках единого понятия объектов глобальных и локальных полей. Традиционно в течение многих лет комплексы активности определялись только на основе наблюдений активных областей. Впервые показано, что Глобальный комплекс включает в себя

Корональные дыры и Активные области. Для анализа использовался большой набор данных наблюдений магнитного поля разных пространственных масштабов, наблюдения активных областей и магнитных полей SOHO/MDI, наблюдения корональных дыр в ультрафиолетовом диапазоне. Показана общность эволюции корональных дыр и активных областей в едином комплексе. При этом оказалось, что контраст корональных дыр, в той же мере как их площадь, определяет скорость связанных с ними потоков солнечного ветра. Проведено также сопоставление с другими характеристиками солнечного ветра (плотность, температура, магнитное поле). Получены относительно высокие значения коэффициентов корреляции со скоростью (0,70...0,89), особенно в периоды умеренной активности, так что данный метод может быть использован для ежедневного прогноза. [Obridko, Shelting, 2011; Obridko et al., 2009].

Показано, что на Солнце всегда существуют только две корональные дыры, генетически связанные с полюсами вращающегося магнитного диполя; в эпохи низкой активности, когда ось диполя параллельна оси вращения Солнца и магнитные полюса располагаются вблизи гелиографических полюсов, КД локализуются в полярных зонах Солнца в виде перманентных полярных КД спокойного Солнца; в ходе цикла активности в результате вращения магнитного диполя КД мигрируют, каждая вместе со своим магнитным полюсом, в сторону экватора по антиподальным траекториям, достигают последнего в максимуме активности и в течение эпохи высокой активности наблюдаются как средне- и низкоширотные антиподальные долгоживущие рекуррентные КД (РКД); после переворота магнитного диполя РКД продолжают дрейф к полюсам Солнца, противоположным исходным и, достигнув их в минимуме, вновь обретают статус перманентных полярных КД спокойного Солнца [Никольская, 2005].

1.9. Модели солнечного цикла, динамо, прогноз высоты следующего цикла

Поиск физических параметров солнечной цикличности ведётся по трём направлениям. Во-первых, уточняются характеристики поверхностной активности, связанные с генерацией магнитного поля, во-вторых, по данным о магнитном поле на поверхности можно найти характеристики спиральности — основного параметра механизма динамо. Наконец, некоторые параметры для модели можно получить по аналогии из уточнения свойств циклов на солнечно подобных звёздах.

Исследовано распределение свойств спиральности солнечных магнитных полей. Обнаружены новые особенности пространственного и временного распределения трассеров альфа-эффекта. Показано, что индивидуальная скорость дифференциального вращения данной активной области (АО) может быть связана с эффективной глубиной залегания.

Совместно с китайскими учёными по данным магнитографа Хуайроу изучены изменения спиральности в цикле магнитной активности, которые накладывают существенные ограничения на механизм солнечного динамо. Совместно с коллегами из Московского государственного университета

имени М. В. Ломоносова (МГУ) проведён анализ динамики солнечной цикличности. Методы теории временных рядов могут предсказывать амплитуду ряда чисел солнечных пятен с достаточно высокой надёжностью. Однако без учёта нелинейности механизма динамо временные характеристики солнечной цикличности недоступны для анализа. Введение спиральности позволяет учитывать нелинейность солнечного цикла. Методы ассимиляции данных, опирающиеся на модель динамо, включающую спиральность, могли бы позволить предсказывать как амплитуду, так и фазу солнечного цикла. Получено правило полярности пространственно-временного распределения токовой спиральности. Это правило сопоставимо с известным правилом полярности Хэйла для солнечных групп пятен, но существенно отличается от него. Согласно предлагаемому правилу, токовая спиральность антисимметрична относительно солнечного экватора, но для данного полушария не меняет (в отличие от групп пятен) знак от цикла к циклу. Кроме того (в отличие от групп пятен), на широтно-временной диаграмме есть сравнительно большие статистически значимые области, в которых токовая спиральность имеет знак, противоположный знаку в среднем по полушарию. Предлагаемая закономерность обоснована в рамках теории солнечного динамо и подтверждена наблюдениями. Развита динамо-модель солнечного цикла, в которой работает как механизм подавления спиральности, так и взаимодействие с полем скорости в форме кросс-спиральности. Перекрёстная (так называемая кросс-) спиральность, произведение векторов магнитного поля и движения вещества среды, играет важнейшую роль в построении самосогласованных моделей динамо. Впервые получена пространственно-временная структура изменения спиральных характеристик магнитного поля в активных областях (токовой спиральности и закрученности) в полном 22-летнем цикле солнечной магнитной активности. Установлено полушарное правило знака спиральности ($-/+$), не меняющееся от нечётного цикла к чётному. На статистически значимом наблюдательном материале по данным Пекинской обсерватории обнаружены регулярные инверсии знака спиральности в определённые фазы роста и спада солнечного цикла. До обнаружения этих фаз ранее существовали неоднозначные толкования вышеописанного полушарного правила. Замечено возможное опережение по времени (порядка двух лет) цикла спиральности по отношению к циклу пятен. Также замечено существенное ослабление спиральности противоположного знака (в фазе инверсии знака) в северном полушарии в конце 23-го цикла. Изучено распределение направления закрученности магнитных структур (хиральность). Установлено, что ряд таких структур связаны с крупномасштабным магнитным полем, они существуют над атмосферой Солнца длительное время. Формирование этих структур согласуется с выносом спиральности из нижней атмосферы. Статистическая обработка наблюдательного материала по этим закрученным структурам доказывает, что знак спиральности крупномасштабного магнитного поля противоположен установленному ранее полушарному правилу для спиральности мелкомасштабных магнитных полей в активных областях в обоих полушариях в течение солнечного цикла. Статистически обработаны данные по среднему векторному магнитному полю в активных областях Солнца. Показано, что они, будучи качественно

отличным от крупномасштабного магнитного поля, это среднее поле согласуется с законом полярности Хэйла, а также меняет знак от чётного цикла к нечётному. При этом азимутальные и радиальные компоненты этого среднего поля в разных полушариях различны по знаку, в то время как меридиональная его компонента имеет один и тот же знак в обоих полушариях в течение одного цикла пятен. С учётом общих свойств симметрии псевдо-скаляра перекрёстной (кросс-) спиральности получено общее уравнение для её генерации и эволюции в солнечном цикле. Развита модель динамо, учитывающая перекрёстную спиральность. Показано, что перекрёстная спиральность, если может быть измерена наблюдательно, могла бы использоваться как мощный фактор диагностики солнечного динамо. Проведено сравнение моделей динамо с локальным подавлением генерации, и моделей с динамическим подавлением спиральности, которые в целом согласуются с наблюдениями динамики спиральности в солнечном цикле. Показано, что первые зачастую более адекватно описывают наблюдательные особенности динамики спиральности. Делается качественный вывод о связи наблюдаемой величины токовой спиральности с расчётными величинами в теории динамо. Показано, что в образовании токовой спиральности магнитного поля в активной области конкурирующую роль могут играть как эффекты закручивания активной области за короткое время её эволюции, так и общая долговременная эволюция магнитогидродинамических течений в механизме солнечного динамо, определяющая 11-летний цикл магнитной активности [Kuzanyan et al., 2006; Obridko et al., 2005; Zhang et al., 2005].

Показано, что асимметрия спиральности меняет свой знак от цикла к циклу, так что она обращается в нуль на большом временном интервале. Анализом данных о вращении активных областей оценивается эффективная глубина, к которой относятся эти структуры.

Изучена связь между данными о спиральности и предсказаниями динамо теории. В частности, показано, что существенный избыток активных областей с «антихейловской» полярностью наблюдается в начале 11-летнего цикла. Показано, что этот избыток связан частично с дополнительным возникновением спиральности при скручивании всплывающих магнитных трубок.

Построено широтно-временное распределение магнитной и токовой спиральности, соответствующее простейшей модели солнечного динамо, т.е. модели Паркера. Построение проведено для всевозможных вариантов этой модели, причём обнаружена устойчивость полученной диаграммы к выбору конкретной разновидности модели. Выяснено, в чём такая диаграмма похожа, а в чём отличается от соответствующей диаграммы, полученной наблюдательно. Показано таким образом, что наблюдение широтно-временной диаграммы токовой спиральности на поверхности Солнца способно существенно прояснить устройство солнечного динамо.

Впервые получена пространственно-временная структура изменения спиральных характеристик магнитного поля в активных областях (токовой спиральности и закрученности) в полном 22-летнем цикле солнечной магнитной активности. Установлено полушарное правило знака спиральности (–/+), не меняющееся от нечётного цикла к чётному [Gao et al., 2013].

На статистически значимом наблюдательном материале по данным Пекинской обсерватории обнаружены регулярные инверсии знака спиральности в определённые фазы роста и спада солнечного цикла. До обнаружения этих фаз ранее существовали неоднозначные толкования вышеописанного полушарного правила. Замечено возможное опережение по времени (порядка двух лет) цикла спиральности по отношению к циклу пятен. Также замечено существенное ослабление спиральности противоположного знака (в фазе инверсии знака) в северном полушарии в конце 23-го цикла.

По данным систематических вектор-магнитографических наблюдений, с учётом внутреннего вращения Солнца, выявлено распределение трассиров спиральности в глубинной. Построена двумерная динамо-модель, описывающая процесс генерации поля. Исследовался вопрос о вариации спиральности с фазой солнечного цикла. Проверялась гипотеза об изменении знака спиральности в начале солнечного цикла. Показано, что при соответствующем усреднении спиральность и альфа-параметр бессилового поля ведут себя одинаково.

Выделены условия и физические механизмы генерации неосесимметричных полей механизмом солнечного и звёздного динамо. Впервые построена математически корректная асимптотика решения неосесимметричной модели динамо. Показано, что широтный градиент дифференциального вращения может обусловить наличие неосесимметричных мод генерации магнитного поля. Даются теоретические оценки эффективности данного механизма. Показано, что этот механизм может работать на некоторых звёздах, но на Солнце он не очень эффективен, хотя и не исключён.

Получены условия вековой модуляции солнечного цикла за счёт взаимодействия динамо волн через экватор. Рассмотрен аналог «задачи Лифшица» в квантовой механике, применительно к солнечным динамоволнам. Взаимодействие северной и южной динамо-волн через потенциальный барьер (экватор) приводит к биению, появлению глобальной модуляции солнечного цикла. Дальнейшие более детальные модели смогут прояснить природу векового цикла.

На основе простейших динамо моделей описана процедура переполюсовки глобального магнитного поля. Оказалось, что по мере приближения ко времени смены ориентации поля ориентация магнитной оси глобального диполя становится довольно случайной, так что в период смены ориентации этот магнит естественно рассматривать как сравнительно долгоживущую флуктуацию. По мере удаления от момента смены ориентации роль флуктуационного поведения падает. Подобное поведение обнаружено как в наблюдательных данных, так и в поведении теоретических моделей магнитного поля [Pipin et al., 2014].

Продолжены работы по исследованию характеристик и свойств последнего 22-летнего цикла СА. Впервые за достоверный период наблюдений солнечной активности чётный цикл СА стал больше нечётного вопреки известному правилу Гневышева-Оля. В этом цикле (в обоих компонентах) впервые в истории наблюдений максимум радиоизлучения Солнца на длине волны 10,7 см значимо (на год-полтора) запаздывал относительно максимума чисел Вольфа. Основные характеристики прошедшего 23-го

цикла солнечной активности практически полностью соответствуют характеристикам солнечных циклов средней величины, а ряд его особенностей могут свидетельствовать о смене режима генерации магнитных полей в конвективной зоне Солнца. В частности, показано, что напряжённость полярного магнитного поля постепенно падает в течение последних трёх циклов. Это связано с тем, что постепенный рост магнитного момента диполя, наблюдавшийся в течение 1915–1976 гг. в последние 30 лет сменился спадом. В то же время поля промежуточных масштабов (как например в изолированных корональных дырах) были необычно сильны в последнее время. В результате искривлённость гелиосферного экватора выше обычной для этой фазы цикла величины. Совокупность данных указывает на возможное наступление векового минимума солнечной активности.

Заблаговременно по аномалиям крупномасштабного поля было предсказано наступление невысокого цикла или группы циклов. Затем по данным о числах пятен без дополнительных предположений осуществлялось нелинейное ретроспективное предсказание (моделирование) 23-го цикла и прогнозирование 24-го цикла солнечной активности с помощью специально сконструированной нейронной сети. При обучении этой сети осуществляется неитеративная оптимизация весов, что исключает попадание в случайный локальный минимум. Исходя из хорошего описания 23-го цикла, был сделан прогноз 24-го. Предсказанный максимум 24-го цикла имеет амплитуду 70 и начинается в апреле 2012 г. Реальные значения чисел Вольфа в первичном максимуме составляют 66,9 и они соответствуют февралю-марту 2012 г. Вторичный максимум, по-видимому, был в апреле 2014 г. и составил 81,9 [Обридко, 2011; Ожередов и др., 2009].

2. ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И ДИНАМИКИ ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ СОЛНЕЧНОЙ АТМОСФЕРЫ

2.1. Крупномасштабная структура короны в цикле солнечной активности

Плазменные образования солнечной атмосферы, наблюдаемые в белом свете (континууме) и в различных спектральных линиях, отражают структуру магнитного поля, которое, в конечном счёте, порождает все явления солнечной активности. Таким образом, хотя магнитное поле в короне пока не удаётся надёжно измерить, плазменные неоднородности обрисовывают магнитные силовые линии и даже дают информацию об электрических токах, текущих в короне.

На основании сравнения общей формы белой короны, распределения корональных лучей и стримеров с потенциальным магнитным полем короны была выдвинута концепция образования видимых корональных структур топологическими особенностями магнитных нейтральных поверхностей ($B_r = 0$). Была построена модель равновесия плазмы в магнитном поле, показывающая повышенную плотность вещества вблизи нейтральных поверхностей [Кучми и др., 2001; Молоденский и др., 1996; Koutchmy et al., 1996]. Складки и сборки этих поверхностей создают специфические

структуры, которые можно отождествить с корональными лучами и стримерами. Об этом свидетельствует сопоставление расчётов магнитного поля в короне с наблюдениями короны во время затмений и с помощью внезатменных коронографов (рис. 1).

Стримеры, располагаясь вдоль нейтральной поверхности над глобальной линией раздела полярностей фотосферного магнитного поля, образуют замкнутый пояс, являющийся основанием гелиосферного токового слоя. Наглядное подтверждение этому дали наблюдения короны во время затмения 1991 г. [Gulyaev, 1992]. Развивая такое представление, Р.А. Гуляев заключил, что большую часть цикла солнечной активности корона имеет более или менее уплощённую форму, а многообразие наблюдаемых корональных форм обусловлено изменением ориентации «плоской» короны по отношению к наблюдателю при вращении Солнца вокруг своей оси [Филиппов, 2009; Филиппов и др., 2004].

Одной из главных проблем в физике солнечной короны была и остаётся проблема нагрева. За многие годы выдвинуто вероятно несколько десятков механизмов, но ни один из них до сих пор не получил признания. Несомненно, что реальный механизм нагрева должен быть связан с магнитным полем, однако формы этой связи до сих пор неизвестны. Все предложенные механизмы можно разделить на две группы. Одна из них (АС) связана с волновыми процессами, другая (ДС) использует в качестве основного процесса выделения энергии медленную или быструю омическую диссипацию. Одной из возможностей для уточнения ситуации является сравнение величины и структуры магнитного поля по измерениям в фотосфере с яркостью зелёной корональной линии 530,3 нм Fe XIV и напряжённостью магнитных полей различных масштабов в короне. Оказалось, что коэффициенты корреляции яркости зелёной корональной линии с напряжённостью полей различных масштабов, вычисленные в зависимости от широты, имеют циклический ход. В зоне пятнообразования коэффициенты корреляции всегда положительны. В этой зоне яркость зелёной линии в большей мере согласуется с напряжённостью полей малых масштабов, соответствующих размерам больших активных областей и комплексов активности.

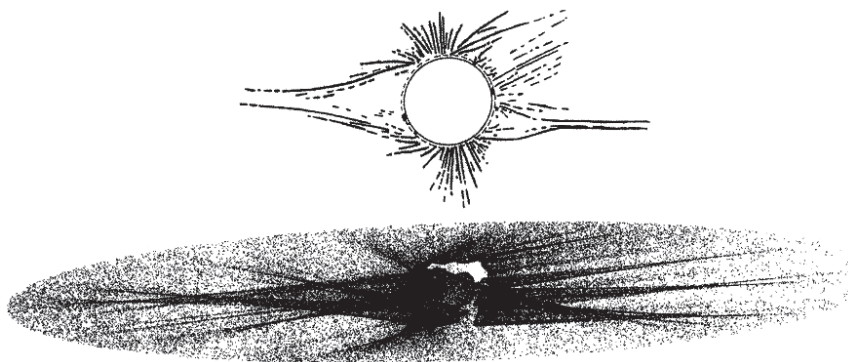


Рис. 1. Структурная схема короны во время затмения 3 ноября 1994 г. (вверху) результат проектирования нейтральной поверхности на картинную плоскость (внизу)

В зоне выше 40° коэффициенты корреляции знакопеременны, они достигают наибольших положительных значений в максимуме цикла и наибольших отрицательных значений в минимуме. Исследована функциональная зависимость яркости зелёной корональной линии I от напряжённости магнитного поля B на высоте свечения этой линии. Эта зависимость для периодов вблизи минимума солнечной активности, которая может быть выражена в виде степенной функции, оказалась совершенно различной для зоны пятнообразования и для более высокоширотной зоны, в которой пятна не возникают. В зоне пятнообразования показатель степени положителен и изменяется в пределах $0,75 \dots 1,00$. В зоне вне пятен показатель степенной функции отрицательный и изменяется в пределах от $-0,6$ до $-0,8$. При исследовании количественной связи между напряжённостью магнитного поля и его компонентами (поперечная и продольная) с яркостью зелёной корональной линии оказалось, что все три коэффициента корреляции, вычисленные отдельно для зоны пятнообразования $\pm 30^\circ$ и для зоны выше 40° , имеют циклический ход, причём изменения соответствующих коэффициентов корреляции в этих зонах происходят в противофазе. Можно полагать, что в зоне пятнообразования большее влияние на формирование излучения в зелёной линии оказывает тангенциальная компонента, что, вероятно, связано с существованием здесь невысоких арочных структур. В высокоширотной зоне, особенно на фазе минимума активности, существенно влияние радиальной компоненты, что, возможно, отражает более сильное проявление крупномасштабных магнитных полей.

Рассмотрен вопрос об адекватности различных теорий нагрева солнечной короны. Это рассмотрение было выполнено на основе связи яркости зелёной корональной линии $530,5 \text{ нм Fe XIV}$ с рассчитанной напряжённостью магнитных полей в короне. Сопоставление было проведено для корональных структур и магнитных полей больших пространственных и временных масштабов. Было проведено сопоставление экспериментальных значений параметров связи яркости и напряжённости магнитного поля с различными теоретическими моделями. Это рассмотрение показало, что ни один из рассмотренных механизмов нагрева короны не объясняет количественно эти эффекты на всех широтах. Сделан вывод, что эффективность того или иного механизма нагрева короны, по-видимому, определяется соотношением площади, занимаемой низкими и высокими петлями (включая открытые структуры). В приэкваториальной зоне более эффективны токовые модели, основанные на медленной диссипации поля (DC), в полярной зоне — волновые модели, основанные на диссипации альвеновских и магнитозвуковых волн (AC). При этом различные механизмы могут одновременно участвовать в процессе нагрева короны, но их относительный вклад меняется в зависимости от широты и фазы цикла.

Этот вывод подтверждается на основе сравнения характеристик излучения Солнца и звёзд. Анализ положения Солнца среди одной тысячи вновь выявленных активных поздних звёзд показал, что рентгеновское излучение Солнца даже в минимуме активности незначительно меньше, а излучение хромосферы в линиях сравнимо с эмиссией звёзд с хорошо выраженными циклами. Проведённый анализ позволяет различать объекты с акустическим нагревом короны, диссипацией магнитных полей в петлях

и процессами, происходящими во время импульсных и длительных вспышек. Различие механизмов нагрева связано главным образом с масштабом магнитных полей.

Изучено распределение яркости и поляризации белой короны Солнца вблизи максимума активности. Это рассмотрение подтвердило ранее полученные выводы о том, что в слоях нижней и средней короны температура в экваториальных слоях составляет примерно 1,4 МК, а распределение плотности близко к гидростатическому, с плотностью в основании короны (параметр гидростатического закона) $3,3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$. Вблизи минимума солнечной активности структура короны имеет характерную форму, с хорошо выраженными полярными лучами. Максимальная степень поляризации в полярных лучах достигается на расстоянии 1,25...1,3 радиуса Солнца от центра диска и на 10 % превышает поляризацию в межлучевом пространстве. Распределение яркости в полярных лучах и в пространстве между ними соответствует температуре в полярной области короны 1 МК. Плотность в основании короны равна $2,7 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ в полярном луче и $2,0 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ в межлучевом пространстве. Совместная интерпретация яркости и поляризации в полярном луче даёт возможность построить модель этого образования. Рассмотрен узкий луч с плотностью в 5 раз превышающей плотность фона. Такая структура, в которой вещество сконцентрировано к картинной плоскости, приводит к увеличению поляризации на несколько процентов.

2.2. Искривление корональных лучей

Корональные стримеры часто имеют в меридиональной плоскости кривизну, направление которой зависит от фазы солнечного цикла. В эпоху минимальной активности оси корональных стримеров изгибаются в сторону экваториальной плоскости, а в эпоху максимума — к полюсам. Очевидно, что такая кривизна должна быть связана со структурой глобального магнитного поля Солнца, которая меняется в ходе цикла. Форма нейтральных поверхностей зависит от расположения нулевых точек поля в короне. Для минимума характерно нахождение нулевых точек в экваториальной плоскости, для максимума — на оси вращения Солнца. При переполюсовке глобального поля, происходящей в эпоху максимума, нулевые точки пересекают фотосферу на полюсах. На рис. 2 показаны силовые линии и сечения нейтральных поверхностей глобального поля, типичного для минимума и максимума [Филиппов и др., 2006]. Нейтральные поверхности как бы «притягиваются» к нулевым точкам, обуславливая кривизну стримеров, следующих вдоль нейтральных поверхностей.

Прохождение седловой структуры, окружающей нулевую точку поля, через полярную область короны во время переполюсовки проявляется в резком изменении геометрической формы полярных перьев — системы тонких корональных лучей в полярных областях Солнца. Перья особенно хорошо различимы в минимумах активности. Их вид очень напоминает картину силовых линий вблизи полюсов постоянного полосового магнита. Касательные к перьям в каждой полусфере пересекаются примерно в од-

ной точке, называемой магнитным фокусом. Положение фокусов плавно меняется в течение цикла и совершает скачок во время переполусовки (рис. 3) [Ajabshirizadeh, Filippov, 2004]. Их динамика отражает фазовый сдвиг циклических изменений магнитных полей разных пространственных масштабов.

На геометрическую форму длинных корональных лучей во внешней короне должно также оказывать влияние вращение Солнца, закручивая их в спирали, предсказанные Е. Паркером. Однако основная кривизна спиралей располагается в экваториальной плоскости, близкой к эклиптике, так что различить её с Земли или околоземной орбиты очень сложно. Некоторые данные удавалось получить из поляризационных измерений [Молоденский, Филиппов, 1992]. Непрерывные наблюдения короны из космоса на подъёме и спаде активности, когда стримеры часто встречаются на средних и высоких широтах, дали возможность зафиксировать и измерить спиральную кривизну лучей.

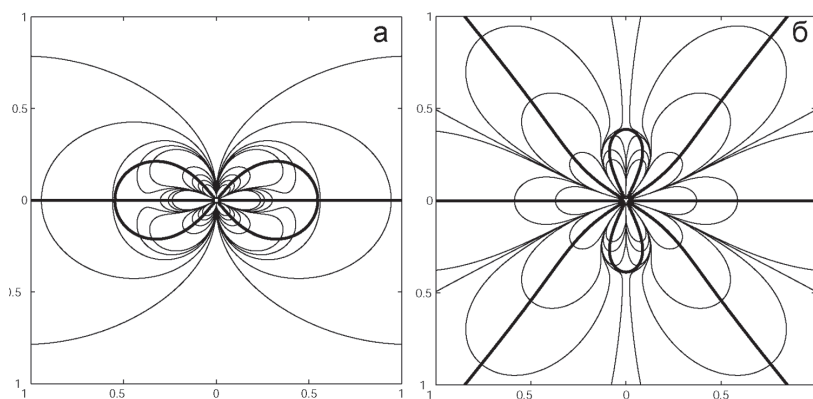


Рис. 2. Силовые линии глобального поля, типичного для минимума (а) и максимума (б). Ось вращения Солнца вертикальна. Жирными линиями показаны сечения нейтральных поверхностей $B_r = 0$

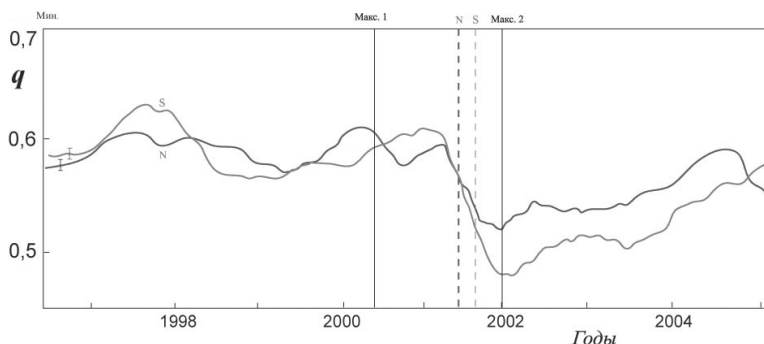


Рис. 3. Зависимость удалённости фокусов от центра солнечного диска q в северном (N) и южном (S) полушарии от времени в 23-м цикле. Вертикальные сплошные линии показывают время двух пиков числа пятен в максимуме цикла, пунктирные линии соответствуют моментам переполусовки в северном и южном полушарии

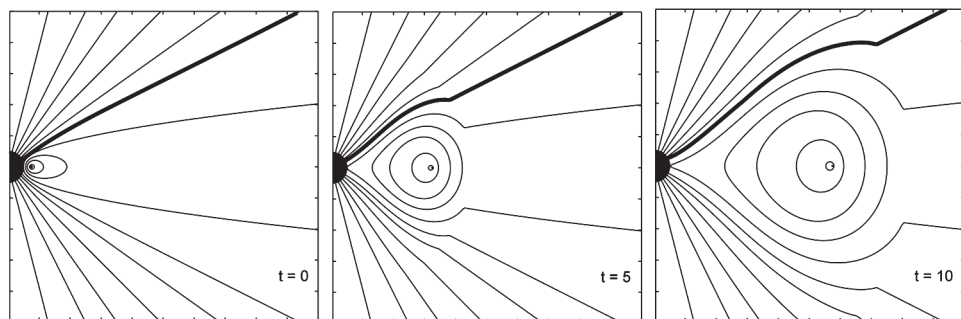


Рис. 4. Искажение радиальных силовых линий движущимся магнитным жгутом

Кратковременные искривления корональных лучей происходят при прохождении корональных выбросов, иногда удалённых на десятки градусов по позиционному углу от лучей. Отклонение и изгиб корональных лучей многие авторы считают проявлением ударной волны (УВ), генерируемой быстрым выбросом в короне. Имеются попытки увидеть в этом явлении распространяющуюся вдоль луча МГД-изгибную волну, возбуждённую импульсным толчком, произведённым выбросом на основании луча. Исследования нескольких таких явлений не показали в них явных признаков ударной или изгибной волны [Filippov, Srivastava, 2010]. Наблюдаемая деформация лучей может быть интерпретирована как воздействие магнитного поля движущегося магнитного жгута, образующего корональный выброс (рис. 4).

2.3. Равновесие и устойчивость протуберанцев в корональном магнитном поле

В некоторых местах солнечной атмосферы магнитное поле очень сложное и запутанное. Пучки корональных петель, демонстрирующих магнитные трубки, нередко оказываются закрученными в жгуты, что свидетельствует о значительных электрических токах, текущих в короне. Для устойчивого равновесия магнитных жгутов в короне благоприятными оказываются области над линиями раздела полярностей, где магнитное поле подфотосферных источников имеет вид аркады. Внутри жгутов имеются участки силовых трубок с кривизной, направленной вверх, что способствует накоплению плотной холодной плазмы, проявляющейся в наблюдениях как протуберанцы и волокна.

Равновесие электрических токов в короне описывается нелинейными МГД-уравнениями. В определённом диапазоне параметров медленные изменения граничных условий приводят к таким же медленной эволюции токовой системы в короне. При этом токи могут усиливаться и «свободная» магнитная энергия накапливаться. Вследствие нелинейности системы, при достижении некоторого предела значений отдельных параметров происходит катастрофа — система переходит в новое равновесное состояние, сильно

отличающееся от первоначального, или же равновесие становится невозможным вообще. По-видимому, именно такой катастрофический процесс и является причиной спорадических эрупций на Солнце [Филиппов, 2007].

Если аппроксимировать зависимость коронального магнитного поля от высоты в каком-то интервале степенной функцией, то для показателя n можно определить критическое значение устойчивости равновесия магнитного жгута в таком поле. Для тонкого длинного жгута, который можно приближено считать прямым линейным электрическим током, критическое значение $n_c = 1$. Высота в короне, где это значение достигается, является предельной для устойчивого равновесия жгута и, следовательно, для существования протуберанца [Filippov, Den, 2001]. Сравнение действительной высоты волокна над фотосферой с рассчитанной предельной высотой даёт информацию о запасе устойчивости волокна, готовности его к эрупции (рис. 5).

Уменьшением характерного масштаба поля, удерживающего протуберанцы полярного венца, а значит и предельной высоты, объясняется наблюдаемое уменьшение средней высоты протуберанцев полярного венца при их широтном дрейфе к полюсам перед переполюсовкой глобального магнитного поля Солнца [Makarov, Filippov, 2003].

2.4. Эруптивные протуберанцы и корональные выбросы материи

Катастрофическая потеря равновесия магнитного жгута порождает цепочку эффектов, наблюдаемых разными способами в различных спектральных диапазонах. Прежде всего — это придание высокой скорости веществу волокна.

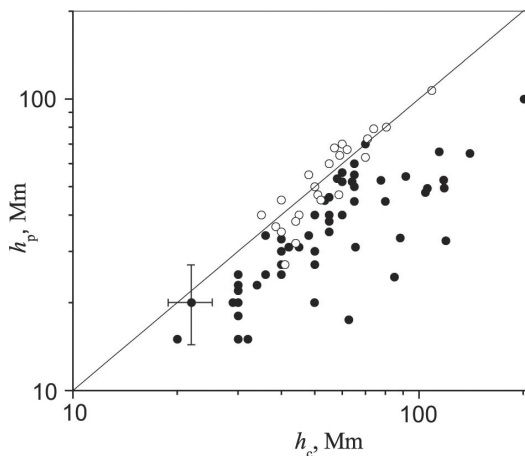


Рис. 5. Диаграмма, демонстрирующая соотношение между критической высотой h_c и высотой отдельных протуберанцев h_p , наблюдавшихся в период с 1998 по 2006 г. Прямая диагональная линия обозначает предел высоты устойчивого равновесия протуберанца. Пустые кружки соответствуют исчезнувшим на диске волокнам, сплошные кружки — спокойным волокнам

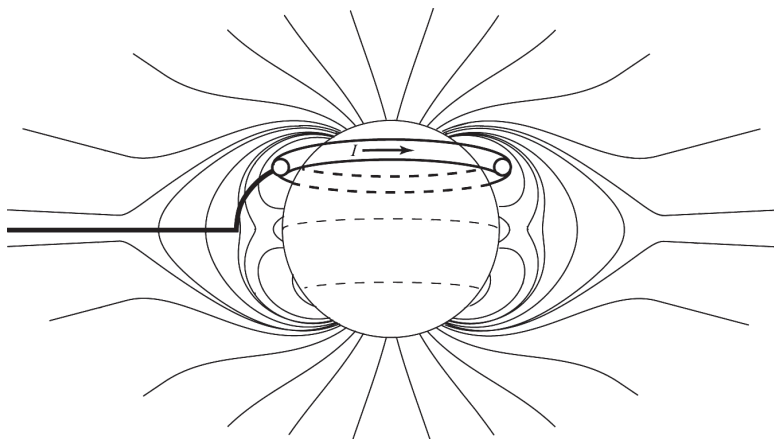


Рис. 6. Силовые линии глобального магнитного поля Солнца, типичного для минимума активности. Тонкие штриховые линии — линии раздела полярностей на поверхности фотосферы. Жирная линия в левой части рисунка показывает геометрическое место точек равновесия магнитного жгута при различных значениях тока I и примерно соответствует траектории движения жгута при эрупции

Значительная, может быть, бо́льшая, часть запасённой магнитной энергии трансформируется в кинетическую энергию макроскопических движений. Быстрые изменения магнитного поля, связанные с вылетом жгута из удерживавшей его аркады магнитных петель, могут привести в действие различные механизмы ускорения частиц и дополнительной трансформации магнитной энергии в тепло и излучение. Большие двух-ленточные вспышки происходят, например, всегда после эрупции волокна. Жгут в своём движении в короне вовлекает большой объём корональной плазмы, образуя корональный выброс. В центральной части огромного облака, вылетающего из короны в межпланетное пространство, часто можно легко различить остатки волокна, сохраняющего спиральную структуру.

Несмотря на высокую статистическую корреляцию эруптивных протуберанцев и корональных выбросов, их тесная физическая связь долгое время ставилась под сомнение из-за различия скоростей, пространственного положения, масштабов. Моделирование эрупции магнитного жгута в корональном поле показывает, что оба явления соответствуют проявлениям эрупции жгута на различных высотах в короне, а различия обусловлены сложной динамикой и особенностям наблюдения. Поднимаясь вверх, жгут одновременно расширяется, поэтому его нижние части, где сосредоточено вещество протуберанца, движутся медленнее самых верхних частей, которые обычно принимаются за фронтальную часть коронального выброса. Траектория подъёма жгута определяется геометрией коронального магнитного поля (рис. 6). В ряде случаев траектория далека от радиального направления (местной вертикали), и жгут проходит большую дистанцию вдоль поверхности Солнца. Это обстоятельство имеет большое значение для определения геоэффективности коронального выброса и должно учитываться при прогнозировании геомагнитных возмущений [Филиппов и др., 2002; Filippov, 1996; Filippov et al., 2001]



а б в Рис. 7. Седловые структуры на Солнце: *а* — фрагмент фильтрограммы в линии $H\alpha$; *б* — экваториальная область Солнца в мягком рентгеновском излучении 3 июня 1993 г. (спутник *Yohkoh*), изображение активной области NOAA 8113 в линии $Fe\ XV\ 284\ \text{\AA}$ 6 декабря 1997 г. (SOHO/EIT)

2.5. Особенности и топология солнечных магнитных полей

Различие коэффициентов переноса вдоль и поперёк магнитного поля приводит к появлению волокнистой структуры плазменных неоднородностей в солнечной атмосфере. Вследствие этого, на изображениях хромосферы и короны можно уверенно указать направление поля в картинной плоскости (с неопределённостью в 180°). Таким образом, фильтрограммы хромосферы и короны пригодны для анализа структуры и топологии солнечных магнитных полей. Можно вообще ставить обратную задачу о восстановлении полной трёхмерной структуры поля по таким данным. Она относится к разряду некорректных, но при определённых приближениях и допущениях может быть решена вполне однозначно.

Распределение фибрилл на диске Солнца задаёт поле направлений магнитного поля на сферической поверхности. Если взять небольшой участок, который можно считать плоским, замкнутым и односвязным, то при отсутствии внутри него особых точек, разработан алгоритм, позволяющий найти распределение потенциала и затем поля с точностью до постоянного общего множителя. При наличии особых точек, приближённое решение задачи даёт поле, которое создаётся не только подфотосферными источниками, но и электрическими токами, пересекающими фотосферу.

Особые точки магнитного поля, и, следовательно, поля направлений фибрилл в хромосфере, являются важнейшими элементами, определяющими общую топологию поля. Особые точки типа узел ассоциируются с солнечными пятнами, которые служат источниками самых сильных полей в короне. Анализ поведения фибрилл вокруг пятна позволяет оценить относительную величину дипольного и квадрупольного моментов, степень непотенциальности поля пятна. Особые точки типа седло в солнечной атмосфере привлекают особое внимание исследователей, потому что с ними связывают места преобразования магнитной энергии в другие виды вследствие перезамыкания силовых линий. В хромосфере фибриллы очерчивают седловую структуру, свидетельствующую об обращении в ноль двух тангенциальных компонент поля (рис. 7*а*). Крупномасштабные сёдла, видимые вблизи экватора на некоторых рентгеновских изображениях Солнца (рис. 7*б*), представляют собой высокосимметричные квадрупольные магнитные конфигурации

с вертикальной нулевой линией в центре. Условия в таком поле чрезвычайно близки к ситуации, описываемой двумерными моделями пересоединения. Однако следов усиленного энерговыделения на нулевой линии на снимках не видно. То же самое относится и к случаю наблюдения трёхмерных нулевых точек в короне (рис. 7е).

В солнечной атмосфере можно найти сепаратрисы, разделяющие области с различными характеристиками силовых линий магнитного поля. В распределении фибрилл вблизи волокон видны сепаратрисы, отделяющие магнитный жгут от окружающего поля. Они указывают на инверсную полярность тангенциального поля внутри канала волокна. Так называемые «проборы», наблюдаемые в ультрафиолетовых корональных линиях, соответствуют линиям изменения знака нормальной компоненты вектора кривизны силовых линий. В структуре потенциального магнитного поля короны существуют области с особыми дифференциальными характеристиками, которые очень вероятно являются благоприятными местами для первичного энерговыделения во время вспышки вследствие магнитного пересоединения [Куликова и др., 1989, 1990; Молоденский, Старкова, 2007; Молоденский и др., 1990, 1991; Филиппов, 1999; Filippov, 2013].

3. ВСПЫШКИ И КОРОНАЛЬНЫЕ ВЫБРОСЫ МАССЫ

3.1. Вспышки и корональные выбросы массы в аспектах солнечной активности

Вспышки и корональные выбросы массы (КВМ) являются наиболее мощными проявлениями солнечной активности. С ростом количества и расширением спектра данных наблюдений с помощью космических аппаратов появилась возможность проведения комплексных исследований этих явлений. Так, в рамках исследования возможности прогноза солнечных вспышечных явлений Ишковым В. Н. рассмотрены наблюдательные закономерности появления вспышечных активных областей и осуществления в них больших солнечных вспышек (БСВ). Из наблюдений за всплытием магнитного потока (ВМП) оказалось возможным суммировать признаки, после которых наступает рост большой вспышечной активности. Для осуществления БСВ необходимо, чтобы новый ВМП был достаточно большим ($>10^{13}$ Вб) и скорость его всплытия была не менее 10^9 Вб/с. Большие солнечные вспышки появляются через 1-2 сут после обнаружения ВМП в пределах АО. Вспышки больших и средних баллов в АО группируются в серии, кортежи. Проведённые исследования распределения БСВ за 1970–1997 гг. показали, что в большинстве случаев они происходят в ограниченном временном интервале. Интервал времени, за который в АО осуществляется основная доля вспышек больших и средних баллов, будем называть периодом вспышечного энерговыделения (ПВЭ). В зависимости от степени развития АО, характеристик её магнитного поля и мощности нового ВМП данный период может занимать от 16 до 80 ч, в среднем 55 ± 30 ч или 16 % времени прохождения АО по диску Солнца. Очень важно отметить: в данном временном интервале происходят все БСВ данной АО, если её площадь

<1000 м. д. п. Для того, чтобы в такой АО произошла другая серия больших вспышек, необходимо всплытие нового магнитного потока. В группах пятен, площадь которых превышает 1000 м. д. п., во время ПВЭ реализуется до 80 % больших вспышек, затем наступает период затишья (~5 сут), после которого наступает второй ПВЭ такой же длительности (примерно 55 ч), во время которого осуществляются остальные большие вспышки [Ishkov, 2013a].

Рассмотрены наблюдательные закономерности появления вспышечных явлений на ветви роста солнечной активности после беспрецедентно затянувшейся фазы минимума 23-24-го циклов СА. Учитывая минимальные параметры солнечных и межпланетных характеристик магнитного поля, и падение величины магнитного поля в тених пятен, которое продолжается и на фазе роста активности 24-го солнечного цикла, можно было ожидать очень медленного роста уровня вспышечной активности. Это подтвердилось из наблюдений: первая вспышка среднего балла осуществилась только в январе 2010 г., т. е. через год после начала текущего цикла. Первая вспышка балла X текущего цикла произошла в феврале 2010 г. через 49 мес после начала текущего цикла, тогда как первая вспышка балла X в 23-м солнечном цикле произошла уже на третьем месяце после его начала. Вспышечные активные области оставались умеренно активными, хотя выявилась одна закономерность, период подготовки вспышечной серии в текущем солнечном цикле заметно уменьшился и в среднем составляет порядка одних суток, которые проходят от первых признаков появления нового всплывающего магнитного потока до начала реализации вспышечной серии. В 23-м цикле этот интервал составлял в среднем 1,5 сут. Возможно, это связано с ожидаемой низкой высотой текущего 24-го солнечного цикла [Ишков, 2011; Ishkov, 2013b].

Анализ ряда вспышек со сложной пространственно-временной структурой выявил важные особенности развития таких событий. Так, хорошая обеспеченность наблюдениями в оптическом, рентгеновском и радиодиапазонах дала возможность провести комплексный анализ вспышки 16 мая 1981 г. В процессе своего развития H_{α} свечение вспышки охватило существенную часть комплекса активных областей, и развитие вспышки проходило в две стадии. На первой, беспятенной, стадии развитие вспышки проходило в областях, свободных от пятен и пор. В этот период вспышка характеризовалась крайне низкой энергетикой. В рентгеновском диапазоне 20...40 кэВ интенсивность всплесков всего лишь в 1,5 раза превышала уровень фона, а плотность потока микроволнового всплеска на 3 ГГц достигла 250 с.ед. На второй, пятенной, стадии вспышечные узлы возникали в районах локализации пятен и пор. Это сразу отразилось на энергетике вспышки. Интенсивность излучения во всех диапазонах частот резко возросла и достигла максимальных значений. Оказалось, что по мере развития вспышки различные всплески электромагнитного излучения генерировались в пространственно разнесённых источниках. Важно также, что именно на второй стадии радиовсплески характеризовались разнообразной тонкой структурой [Ишков и др., 1985; Ishkov et al., 1985].

Такой же комплексный анализ знаменитой вспышки 14 июля 2000 г. (вспышка Бастилии) выявил связь резкого усиления радиоизлучения

с началом быстрого развития мощной системы постэруптивных петельных структур. Фрагментарный характер энерговыделения в процессе образования отдельных петель привёл к появлению в радиоизлучении тонкой структуры в виде пульсаций или быстро дрейфующих всплесков, аналогичных всплескам III типа.

Концепция множественности процессов ускорения частиц на Солнце имеет большое значение для понимания физических процессов, происходящих в солнечных вспышках со сложной пространственной и временной структурами. Так знаменитое экстремальное солнечное событие 20 января 2005 г. было проанализировано в двух аспектах [Miroshnichenko, Gan, 2012]. Во-первых, на основе разнообразных данных, полученных с помощью RHESSI, «КОРОНАС-Ф»/СОНГ; MDI, EIT, LASCO на SOHO; TRACE, H α -телескопа Кулгура, радиополяриметров Нобейма и др., изучены временные, спектральные и пространственные характеристики основной фазы вспышки, когда наблюдалось наиболее мощное излучение в диапазоне от микроволнового всплеска до гамма-излучения с энергией фотонов до 200 МэВ. Во-вторых, на основе результатов анализа вспышки проанализировано происхождение солнечных энергичных частиц, пришедших к Земле, в аспекте давней проблемы их ускорения или непосредственно во вспышке, или во фронте ударной волны перед корональным выбросом массы. Анализ показал, что в течение основной фазы вспышки электромагнитное излучение всех видов, от микроволн до гамма-линии 2,22 МэВ, исходило из компактных структур, локализованных непосредственно над тенями пятен. В частности, имел место мощнейший микроволновый радиовсплеск с пиковой плотностью потока порядка 10^5 с.ед.п. и частотой спектрального максимума около 30 ГГц, что указывает на присутствие большого количества энергичных электронов в очень сильных магнитных полях. Это даёт основания заключить, что протоны и электроны, ответственные за различные вспышечные излучения, в течение основной фазы вспышки были ускорены в магнитосфере активной области. Начальная импульсная часть одного из самых больших наземных возрастаний (GLEs — Ground Level Enhancements) солнечных космических лучей (СКЛ) и высокоэнергичного гамма-излучения, возникающего в процессе распада нейтральных пионов, имели одинаковые профили и хорошо соответствовали друг другу по времени. При этом, хотя прямые данные о локализации пионного излучения отсутствуют, есть свидетельства того, что оно имело то же происхождение, что и более низкоэнергичное гамма-излучение в линии 2,22 МэВ. С другой стороны, согласно проведённым оценкам, скорость KBM в картинной плоскости заключалась в пределах 2000...2600 км/с, т.е. была достаточно высокой, но не рекордной, и имела тот же порядок, что и предшествующие KBM из той же активной области, не сопровождавшиеся GLE. Следовательно, скорее сама вспышка, чем KBM, определяла экстремальность данного события. На основе проведённого анализа сделан вывод, что ускорение электронов и протонов, во всяком случае, до субрелятивистских энергий, ответственных за основное вспышечное излучение и начальный спайк СКЛ, включая GLE, вероятно, происходило примерно одновременно непосредственно в области вспышки. Однако настоящий анализ не позволяет исключить возможный вклад ускорения протонов на

ударной волне в начальный импульс GLE и, особенно, на более поздних стадиях возрастания СКЛ.

Анализ рентгеновских наблюдений на спутниках «Марс-Одиссей» и RHESSI с самого начала развития 486-й группы (21–26 октября 2003 г.) показал, что усиление активности происходит не только вследствие всплытия новых магнитных потоков (и групп-сателлитов), но и в результате взаимодействия и синхронизации всех двух, а затем и трёх больших групп. Иначе говоря, появление экстремально мощных нестационарных процессов связано в некоторых случаях с относительно более высоким вкладом крупномасштабных магнитных полей. Закончен второй этап развития предложенной ранее модели мощных нестационарных процессов на Солнце — анализ радио и рентгеновских наблюдений вспышки 25 января 2007 г. и нескольких других подтвердил существование большого количества плазмы, задерживающейся в короне после вспышечного СМЕ (coronal mass ejection) и участвующего затем в формировании пост-эруптивной аркады (совместно с Главной (Пулковской) астрономической обсерваторией Российской академии наук (ГАО РАН) и Специальной астрофизической обсерваторией Российской академии наук (САО РАН)). Сформулирован третий этап — постановка газодинамической задачи моделирования процесса. Всесторонне проанализированы события 14 июля 2005 г. в группе 10786 с многочисленными очагами развития нестационарных процессов. Рентгеновское излучение двух лимбовых вспышек M 9.1 и X 1.2, начавшихся в 5:56 и 10:16 UT (Universal Time — всемирное время) соответственно, наблюдалось в диапазоне 30 кэВ — 2 МэВ с двух направлений, различающихся примерно на 40°, с околomarсианской и околоземной орбит (КА «Марс-Одиссей» — аппаратура ИКИ РАН, «КОРОНАС-Ф», наземные радиоданные ИЗМИРАН и международной сети). Мощное импульсное энерговыделение происходит с большим запаздыванием относительно начала явлений — для первой вспышки более чем на час. Показано, что медленное развитие событий после начала СМЕ провоцирует возникновение мощных импульсов, способствующих дополнительному выбросу вещества на значительные высоты в короне. Выяснено, что после этих двух событий западнее линии Солнце-Земля образовалось большое облако замагниченной плазмы, вызвавшее на земле большой форбуш-эффект, без прихода возмущения к Земле и, соответственно, магнитной бури. Для нескольких более слабых событий — 25 января 2007 г. и др. по данным РАТАН-600 (РАдиоТелескоп Академии Наук) и международной сети показано, что на пост-эруптивной фазе образуется большое облако горячей плазмы, тепловое излучение которой доминирует в микроволновом и мягком рентгеновском излучении источника, располагающегося в непосредственной близости от вершины арок (совместно с ГАО РАН и САО РАН). Для разрешения противоречия результатов наблюдений постэруптивных (ПЭ) аркад на РАТАН-600 с другими данными были привлечены измерения STEREO, определена зависимость дифференциальной меры эмиссии от температуры и вычислено микроволновое магнитотормозное излучение тепловой плазмы. Построенная многотемпературная модель позволяет объяснить эволюцию микроволнового спектра ПЭ-аркад на фазе спада явлений без привлечения вклада ускоренных электронов. В появившейся непротиворечивой

картине эволюции большого облака плазмы необходимо допустить большую напряжённостью магнитного поля в основаниях петель, которая быстро уменьшается с высотой.

Продолжен анализ данных о жёстком рентгеновском излучении, зарегистрированном на КА Mars Odyssey аппаратурой ИКИ РАН. Подготовлен к печати каталог жёстких рентгеновских всплесков, зарегистрированных на видимой и не видимой с Земли полусферах Солнца.. Выполнен анализ двух вспышек 14 июля 2005 г., позволяющий отдельно изучать характеристики вспышек и рассматривать очаги их возникновения близ пятен и над нейтральной линией магнитного поля. В слабом всплеске после 11:00 UT, завершающем импульсную фазу мощной вспышки, по одновременным стереоскопическим наблюдениям на Mars Odyssey и RHESSI и «КОРОНАС-Ф» отмечена направленность излучения коронального источника в диапазоне около 80 кэВ. Эта же группа средних размеров № 10786 использована в качестве теста для анализа вспышечной активности 10 областей, самых продуктивных по количеству М- и Х-вспышек. При анализе самых больших групп пятен ранее было показано, что изменение топологии магнитного поля (данные MDI/SOHO) предшествует периодам высокой вспышечной активности либо происходит в то же время. Основным фактором топологических изменений является всплытие новых магнитных полей. В 2011 г. этот результат подтверждён также и на примере двух групп с площадью около 500 м.д.п., причём для них разделяются процессы вблизи нейтральной линии, с изменениями слабых полей, и вблизи пятен, с изменением топологии полей с напряжённостью около 700 Гс. Закончена работа по определению направленности излучения вспышек — при наблюдениях под углами, различающимися на 42°, отношение потоков в диапазоне 80...100 кэВ достигает дух раз.

Показано, что приближение газового давления к магнитному в вершине петель является благоприятным фактором для развития СМЕ; этот вывод позволил начать работу по анализу связи СМЕ и жёстких рентгеновских всплесков на видимой и обратной стороне Солнца. Проведена калибровка прибора ИКИ РАН — детектора нейтронов высоких энергий HEND (High Energy Neutron Detector) применительно к длительным измерениям жёсткого рентгеновского излучения солнечных вспышек, позволившая определять профили и спектры событий в диапазоне от 30 до 500 кэВ. Подготовлен к печати каталог мощных вспышек, зарегистрированных HEND при работе на орбите вокруг Марса в 2001–2011 гг., включающий в себя потоки фотонов, показатели спектра и краткое описание сопутствующих явлений. Проанализированы эффекты от мощных вспышек на обратной стороне Солнца, наблюдающиеся с Земли и околоземных орбит. Впервые зафиксированы рентгеновский и развивающийся затем радио источники, связанные последовательно с приходом на видимый с Земли лимб ускоренных электронов и крупномасштабного газодинамического возмущения (волны). На основе анализа совокупности внеатмосферных и наземных данных проанализировано развитие явлений, развивающихся после мощного импульсного выделения энергии. Выявлены случаи выброса системы петель (06.07.2006г.), пост-импульсных и пост-эруптивных явлений и их связи со СМЕ и диммингами. Изучена роль всплытия нового магнитного потока в инициировании вспышек [Лившиц и др., 2005].

На основе анализа поведения плазмы в источниках мягкого рентгеновского излучения серий гомологичных вспышек ноября 2000 г., октября-ноября 2003 г. и др. обнаружено, что наклон прямой $\lg T - 1/2 \lg EM$ на фазе спада явлений зависит от максимальной температуры в системах петель, и эта зависимость постепенно эволюционирует от серий коротких к сериям длительных, мощных явлений. Аналитически и путём численного моделирования баланса энергии в петле показано, что такое поведение горячего источника связано с его сильной зависимостью от энергетики импульсных эпизодов того же события, предшествующих постэруптивной фазе. Эти результаты позволили уточнить классификацию мощных солнечных вспышек в смысле перехода от компактных явлений к длительным вспышкам с гигантскими арочными системами [Лившиц, Бадалян, 2004].

Завершён анализ временных профилей жёсткого излучения около 30 вспышек, зарегистрированных аппаратурой HEND (ИКИ РАН) межпланетной станции «Марс Одиссей». Стереоскопические наблюдения лимбовых вспышек на марсианском и околоземных космических аппаратах показали, что подавляющая часть излучения с энергией более 80 кэВ возникает на высотах, не превосходящих 7...10 тыс. км. Сравнение результатов КА «Марс Одиссей» и «КОРОНАС-Ф» позволило детально изучить восход группы 10486 в октябре 2003 г. и продемонстрировать для вспышек на диске отсутствие анизотропии жёсткого излучения. Высказана идея о том, что отношение газового давления к магнитному — плазменное бета — может в отличие от общепринятых представлений должно приближаться к единице на заключительной стадии вспышек. Анализ одновременных наблюдений постэруптивной аркады на «КОРОНАС-Ф»/СПИРИТ и многими космическими и наземными инструментами подтвердил эту идею, что свидетельствует о том, что газодинамические, а не МГД-процессы ответственны за многочасовую эволюцию постэруптивной аркады [Borovik et al., 2005].

По ставшим доступными данным жёсткого рентгеновского телескопа Yohkoh Hard X-ray Telescope (НХТ) показано, наибольшее отношение потоков гамма- и рентгеновского телескопов достигается во вспышках баллов M5-X5 с расстоянием между основаниями излучающей петли 15...25 угл.с (11...18 тыс. км). Наряду с анализом СКЛ, это свидетельствует о том, что для обеспечения наиболее эффективного ускорения частиц необходима не только достаточная мощность всего явления, но и определённый масштаб магнитного поля, участвующего в нестационарном процессе [Осокин и др., 2007].

Детально исследован гамма-всплеск в линии 2,223 МэВ от вспышки 28 октября 2003 г. по данным космической обсерватории INTEGRAL в предположении о бесселевском энергетическом спектре исходных ускоренных заряженных частиц (стохастическое ускорение). По методу Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д. В. Скобельцына (НИИЯФ) МГУ (SINP code) проведены модельные расчёты временных профилей флюенсов для этой линии, возникающей вследствие захвата нейтронов ядрами водорода в фотосфере Солнца. Найдены два эффекта — уплотнение подвспышечной плазмы (эффект EDE) в фотосферных слоях и ужесточение спектра частиц со временем на фазе спада

гамма-излучения. Тем самым получено новое подтверждение аналогичных результатов, полученных ранее для трёх других гамма-вспышек — 16 декабря 1988 г., 22 марта 1991 г. и 6 ноября 1997 г. Тем же методом и в рамках таких же модельных предположений проведён анализ данных космического аппарата CORONAS-F по линии 2,223 МэВ для вспышки 20 января 2005 г. В отличие от ранее исследованных четырёх вспышек, моделирование с достаточной точностью оказывается невозможным. Обнаружен дефицит наблюдаемых флюенсов излучения на фазе спада гамма-всплеска по сравнению с модельными расчётами. В качестве возможной причины расхождения рассматривается повышенное содержание ^3He по отношению к водороду ^1H (по числу атомов), по сравнению с принятым значением $^3\text{He}/^1\text{H} = 2 \cdot 10^{-5}$. Расчёты показывают, что это отношение должно составлять не менее $8 \cdot 10^{-5}$.

По данным наземных, стратосферных и спутниковых наблюдений детально изучены выдающиеся протонные события (GLE) — наземные возрастания СКЛ 29 сентября 1989 г., 14 июля 2000 г., 28 октября 2003 г. и 20 января 2005 г. Наблюдаемые спектры релятивистских протонов в таких событиях указывают на множественность и многоступенчатость (иерархию) ускорительных механизмов на Солнце. В указанных событиях, как и в ряде других GLEs, исследованных нами ранее, можно выделить две релятивистские компоненты СКЛ — быструю (БК) и задержанную (ЗК). В рамках развиваемой модели двух источников генерации СКЛ показано, что в релятивистской области энергий на Солнце действуют два основных ускорительных механизма — ускорение в нейтральном токовом слое (для БК) и стохастическое ускорение (для ЗК), связанное с расширяющейся магнитной петлёй. Проведён критический анализ альтернативного подхода — описания спектров СКЛ на основе модели ускорения частиц ударной волной, генерируемой СМЕ. Показано, что эта модель пригодна в основном для описания спектров в нерелятивистской области энергий. Существующие модели ускорения на ударной волне не в состоянии удовлетворительно объяснить характеристики быстрой компоненты СКЛ. Однако связь между ускорением частиц во вспышках, выбросом СМЕ и генерацией УВ представляется вполне естественной в рамках общего сценария крупного возмущения в солнечной атмосфере. В частности, частицы, ускоренные на УВ, могут давать частичный вклад в задержанную компоненту СКЛ. [Miroshnichenko, Perez-Peraza, 2008].

Техника вэйвлет-анализа, впервые использованная в 2009 г. для изучения релятивистских протонных событий (GLEs), позволила выявить в интенсивности галактических космических лучей (ГКЛ) перед GLEs ряд пульсаций, которые можно считать предвестниками генерации будущих протонных событий (прихода энергичных солнечных протонов к Земле). Кроме того, в диапазоне периодов ~ 1 сут выявлены аналогичные пульсации в поведении числа солнечных пятен (SS) и коронального индекса (CI). Это совпадение явно указывает на синхронизацию подфотосферных и корональных процессов, ответственных за генерацию СКЛ. Иными словами, ускорение СКЛ может быть не локальным явлением, но способно вовлекать обширные области в атмосфере Солнца (протяжённые корональные структуры).

На основе результатов комплексного анализа многоволновых данных (рентгеновское и гамма-излучение, оптические наблюдения, данные об энергичных солнечных протонах) в 2010–2011 гг. разработана новая топологическая модель магнитного поля в короне Солнца (магнитная ловушка — «пробкотрон») и новый сценарий событий типа 23 июля 2002 г. Получены указания на возможность ускорения частиц (ионов) вихревым электрическим полем в корональных арках быстрого СМЕ до энергий $\sim 10\ldots 100$ МэВ с достаточно мягким спектром (показатель $\geq 4-5$). Этот результат позволяет объяснить особенности генерации гамма-излучения в данной вспышке на основе учёта взаимодействий ускоренных и фоновых ядер в атмосфере Солнца. Как следствие модели, гамма-источник в линиях возбуждения ($\sim 4, 1\ldots 6, 7$ МэВ) должен совпадать с областью взаимодействия (удержания) ускоренных частиц, а источник вторичных нейтронов вблизи лимба оказывается более эффективным, чем на диске. Последний вывод важен для изучения экстремальных событий типа вспышки 29 сентября 1989 г.: хотя собственно вспышка произошла за W-лимбом, линия захвата нейтрона водородом в фотосфере с энергией 2,223 МэВ была уверенно зарегистрирована на борту околоземного КА SMM [Кичигин и др., 2012].

3.2. Вспышки и корональные выбросы массы в аспектах космической погоды

Ультрафиолетовая и магнитная диагностика крупномасштабных солнечных эрупций-источников нерекуррентных возмущений космической погоды

В серии работ [см. например, [Черток, 2008; Черток и др., 2009]] исследованы характеристики диммингов, наблюдающихся в крайнем ультрафиолете после корональных выбросов массы. Димминги — это крупномасштабные области пониженной яркости крайнего УФ и мягкого рентгеновского излучения, возникающие в короне в результате KBM. Анализ различных данных (SOHO/EIT 195 Å, Yohkoh/SXT, SOHO/LASCO, «КОРОНАС»/СПИРИТ) показал, что димминги визуализируют структуры, вовлечённые в процесс KBM, и, скорее всего, образуются вследствие раскрытия (вытягивания) силовых линий магнитного поля и истечения плазмы из этих транзитных корональных дыр. Важным при таком анализе является получение фиксированных деротированных разностных гелиограмм, т.е. с предварительной компенсацией солнечного вращения. Разработанная методика позволила проанализировать большое количество крупномасштабных возмущений, связанных как с мощными вспышками и KBM, так и с эрупцией волокон вне активных областей. Показано, что характеристики диммингов в этих случаях близки, а в процесс эрупции крупных KBM оказываются вовлечёнными структуры глобальной солнечной магнитосферы с пространственным масштабом, намного превосходящим размеры активных областей и обычных комплексов активности.

На примере экстремально мощных событий октября-ноября 2003 г. показано, что возникающие вслед за эрупцией крупного KBM димминги,

а также корональные волны, имеют глобальный характер и могут охватывать значительную часть солнечного диска. Это означает, что в процесс эрупции КВМ оказываются вовлечёнными крупномасштабные структуры глобальной солнечной магнитосферы. На основе сравнения диммингов в линиях разных температур показано, в частности, что процесс существенной перестройки магнитного поля, частичного открытия силовых линий и истечения вещества происходит не только в короне, но и затрагивает холодную плазму переходного слоя (ПС). В повторяющихся эруптивных событиях, возникающих в виде серии из одного и того же центра эрупции, обнаружена гомология крупномасштабных диммингов и корональных волн.

Экстремально мощная активность в октября-ноября 2003 г. проанализирована также по проводимым в ИЗМИРАН регулярным ежедневным наблюдениям в интервале 06–12 UT при помощи цифровых радиоспектрографов в диапазоне 25...270 МГц и радиометров на частотах 169; 204 и 3000 МГц. Первое прохождение грандиозного комплекса активных областей по диску сопровождалось интенсивной шумовой бурей на метровых волнах. Это свидетельствует о перманентном ускорении электронов с энергиями десятки килоэлектронвольт над эволюционирующим активным комплексом. На этом фоне были зарегистрированы мощные микроволновые и метровые радиовсплески, связанные с несколькими эруптивными событиями, включая наиболее геоэффективные из них 28 октября и 18 ноября. Динамические спектры этих событий обнаруживают многополосные, иногда необычно быстро дрейфующие всплески II типа, возбуждаемые ударными волнами, связанными с КВМ, а также разнообразные континуальные всплески. В ряде случаев соответствующий микроволновый всплеск на 3000 МГц включал не только импульсную компоненту, совпадающую с максимумом вспышки, но также преобладающую задержанную продолжительную компоненту с плавным временным профилем. Предполагается, что последняя компонента связана с постэруптивным энерговыделением и ускорением частиц на стадии, когда магнитное поле в обширной области короны, сильно возмущённое КВМ, релаксирует к новой квазиравновесной конфигурации посредством пересоединения высоко в короне.

Как отмечалось выше, анализ различных данных свидетельствует о том, что димминги визуализируют структуры, вовлечённые в процесс КВМ, и, скорее всего, образуются вследствие раскрытия (вытягивания) силовых линий магнитного поля и истечения плазмы из этих транзиентных корональных дыр. Это даёт основания предполагать, что локализация и количественные характеристики диммингов (площадь, глубина) могут оказаться информативным прогностическим фактором для оценки интенсивности нерекуррентных геомагнитных бурь, вызываемых КВМ. Очевидно, что при таких оценках должны учитываться димминги, (1) локализованные в центральном секторе солнечного диска и (2) совпадающие со структурами, где, судя по фотосферным магнитограммам, преобладает сильная южная меридиональная компонента магнитного поля, при которой, как можно ожидать, повышается вероятность отрицательной B_z -компоненты в межпланетных магнитных облаках. Изложенная концепция проиллю-

стрирована в серии работ (см. например [Chertok et al., 2013; 2014]) на ряде димминговых событий, наблюдаемых на деротированных фиксированных разностных гелиограммах SOHO/EIT. В частности, проиллюстрирована методика расчёта площади и объёма диммингов, локализованных в центральной зоне солнечного диска и совпадающих с корональными структурами, где преобладает южная меридиональная компонента магнитного поля.

В рамках такой концепции разработаны основы ультрафиолетовой диагностики крупномасштабных солнечных эрупций — источников интенсивных нерекуррентных геомагнитных бурь и форбуш-понижений — по количественным характеристикам диммингов (транзientных корональных дыр) и постэруптивных аркад, вызываемых корональными выбросами (Coronal Mass Ejections — CMEs). В качестве основного эруптивного параметра использован суммарный магнитный поток диммингов и аркад на уровне фотосферы, определяемый по данным телескопа крайнего ультрафиолетового диапазона SOHO/EIT в канале 195 Å и магнитограммам SOHO/MDI. Рассмотрено около 50 событий 23-го цикла, в которых интенсивные геомагнитные бури с амплитудой $Dst < -100$ нТл надёжно отождествлены с их источниками в центральной зоне солнечного диска. Показано, что для таких событий эруптивный магнитный поток обнаруживает тесную статистическую связь с основными характеристиками возмущений космической погоды: глубиной форбуш-понижений, интенсивностью геомагнитных бурь (даже без учёта факторов, определяющих знак V_z -компоненты межпланетного магнитного поля (ММП)) и транзитными временами начала и пика геомагнитных бурь. Определены соответствующие эмпирические соотношения. Полученные результаты означают, что характеристики сильных нерекуррентных возмущений космической погоды и время распространения межпланетных облаков от Солнца до Земли в значительной мере определяются измеряемыми параметрами солнечных эрупций и могут оцениваться заблаговременно по наблюдениям диммингов и аркад в крайнем УФ-диапазоне (рис. 8–10).

Определено также соотношение между магнитным потоком солнечных эрупций и A_p -индексом геомагнитных бурь. По материалам 23-го цикла определена зависимость между магнитным потоком диммингов и аркад на уровне фотосферы (Φ) и геомагнитным индексом A_p , характеризующим интенсивность нерекуррентных геомагнитных бурь. Показано, что при увеличении магнитного потока от десятков до $\Phi \approx 500$ (в единицах 10^{20} Мкс), интенсивность геомагнитных бурь, измеряемая 3-часовым A_p -индексом, возрастает в среднем от $A_p \approx 50$ до формально максимальной величины 400 (в единицах 2 нТл). Установленное соотношение свидетельствует о том, что физически реальная величина A_p -индекса не ограничена и в наиболее сильных геомагнитных бурях может существенно превышать формальный предел 400. Зависимость между эруптивным магнитным потоком и A_p -индексом позволяет оценить величину этого превышения в конкретных событиях. Результаты анализа ещё раз свидетельствуют, что параметры нерекуррентных геомагнитных бурь (а также форбуш-понижений интенсивности галактических космических лучей), вызываемых корональными/межпланетными выбросами (CMEs/ICMEs) в значительной мере

определяются энергетикой и пространственными размерами солнечных эрупций, несмотря на многие другие факторы, влияющие на распространение межпланетных транзиентов от Солнца до Земли.

Во временных рядах числа солнечных пятен SS, коронального индекса CI и величины η обнаружен основной (доминирующий, контролирующий) период ~ 11 лет, который сохраняется в течение всего интервала 1942—2012 гг. При этом проявляются высокая степень синхронизации и чёткие линейные соотношения между фазами осцилляций η , SS и CI.

Это означает, что генерация СКЛ высокой энергии не является изолированным (локальным) стохастическим явлением, характерным исключительно для хромосферных и/или корональных структур. В действительности этот процесс может носить глобальный характер и затрагивать большие области в атмосфере Солнца [Мирошниченко и др., 2012].

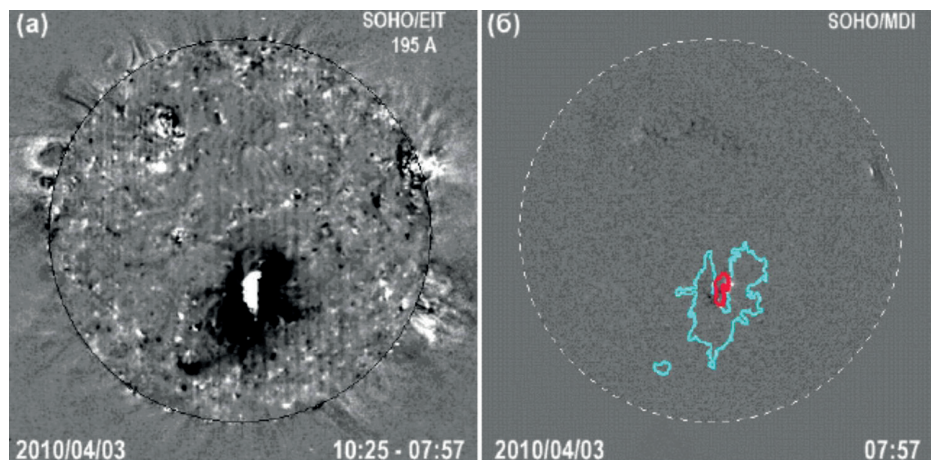


Рис. 8. Эрупция 3 апреля 2010 г.: (а) — разностное изображение солнечного диска в канале 195 Å с диммингами (тёмные области) и ПЭ аркадой (яркая структура); (б) — контуры диммингов и аркады на фоне магнитограммы MDI

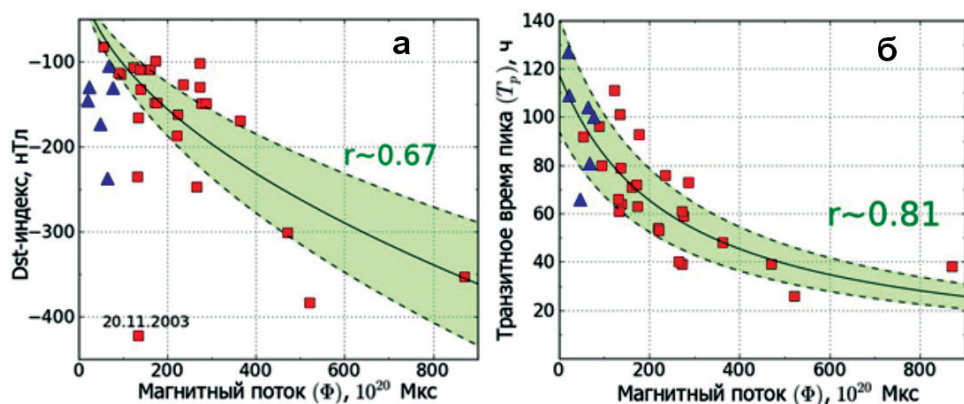


Рис. 9. Зависимость интенсивности (Dst -индекс) (а) и времени пика (б) геомагнитных бурь от магнитного потока солнечных эрупций

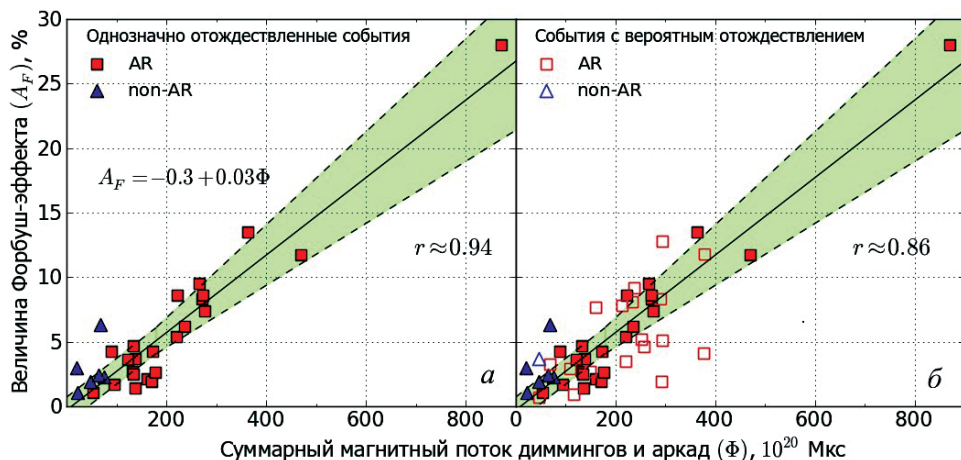


Рис. 10. Зависимость величины форбуш-понижения (A_F) от суммарного магнитного потока диммингов и аркад на уровне фотосферы: *а* — однозначно отождествлённые одиночные события, которые произошли в активной области (■) и вне АО (▲); *б* — все события, включая сложные, связанные с несколькими CMEs/ICMEs, и/или события, не однозначно отождествлённые с солнечным источником, произошедшие в АО (□) и вне АО (△). Данные взяты из каталога CDAW (Coordinated Data Analysis Workshop)

Показано, что в течение 23-го солнечного цикла (1996–2009) изменения максимальной скорости КВМ коррелируют с изменениями крупномасштабной структуры магнитного поля Солнца (изменениями индекса эффективного солнечного мультиполя n). При этом в отличие от средних значений скорости КВМ значениям максимальной скорости КВМ соответствуют максимальные значения индекса эффективного мультиполя n . Это свидетельствует о том, что при уменьшении размера структурных элементов КМПС (росте n) создаются благоприятные условия для объединения больших и сложных групп пятен (активных областей), возникающих вблизи границ этих элементов, в единый сложный комплекс из нескольких активных областей, связанных между собой корональными арочными структурами.

При увеличении характерных размеров элементов структуры КМПС (уменьшении n на ветви спада) условия для создания больших и сложных комплексов из нескольких активных областей ухудшаются, вследствие чего уменьшаются как размеры этих комплексов, так и мощность (скорость) КВМ, возникающих в этих комплексах. В конце фазы спада (2007–2009) при значительном росте характерных размеров элементов КМПС возникновение больших корональных арочных структур и соответственно мощных высокоскоростных КВМ становится невозможным. В это время наблюдается относительный рост частоты возникновения слабых низкоскоростных КВМ, возникающих в отдельных относительно небольших источниках (пятнах и эруптирующих волокнах).

Исследована зависимость места возникновения КВМ от топологической структуры крупномасштабного магнитного поля Солнца (КМПС).

Исследовано рассеяние как вспышек, так и эруптивных протуберанцев (предполагаемых мест возникновения КВМ) относительно осей соответствующих КВМ. Показано, что в большинстве случаев предполагаемые места возникновения КВМ не совпадают с местами возникновения вспышек и эруптивных протуберанцев и что, по крайней мере, для наиболее интенсивных корональных выбросов массы существенно лучшая концентрация КВМ к нейтральной линии на поверхности источника (основанию гелиосферного токового слоя) наблюдается в том случае, когда предполагаемое место выброса КВМ не совпадает с местом соответствующей вспышки на поверхности Солнца, а находится на пересечении нейтральной магнитной линии, связывающей эту вспышку с вершиной соответствующей корональной арки, связывающей между собой активные области, входящие в единый комплекс из нескольких активных областей.

С помощью техники вэйвлет-анализа был предпринят поиск осцилляций потока ГКЛ, числа солнечных пятен SS и коронального индекса CI, эволюция которых могла бы служить предвестником GLE. Из общего числа 70 GLE, зарегистрированных в 1942–2006 гг., для анализа были отобраны четыре выдающихся события — 23 февраля 1956 г., 14 июля 2000 г., 28 октября 2003 г. и 20 января 2005 г. На их примере показано, что по мере приближения дня события GLE частота осцилляций ГКЛ уменьшается. Изучены также характеристики общих осцилляций потоков ГКЛ и СКЛ внутри временного интервала отдельного GLE. Особый интерес представляют вариации частоты GLE η в зависимости от уровня CA на различных стадиях солнечного цикла. Вэйвлет-анализ частоты регистрации событий GLE η (наземных возрастаний СКЛ) за весь период их наблюдений (с 1942 г.) подтвердил известную ранее тенденцию GLE группироваться, в основном, на восходящей и нисходящей ветвях солнечного цикла. Такая тенденция, по-видимому, обусловлена особенностями пространственно-временной динамики ГМП Солнца. Накопленная статистика (71 GLE за период 1942–2012 гг.) позволяет поставить вопрос о связи между величиной η , характеристиками солнечного цикла и инверсиями ГМП Солнца. Наземные возрастания СКЛ, по-видимому, являются «запрещёнными» во время переходной фазы цикла, когда происходит изменение знака ГМП (геомагнитное поле). Эти результаты представляются важными для понимания эволюции глобального и локальных магнитных полей Солнца в 11-летнем цикле солнечных пятен и его 22-летнем магнитном цикле.

Фаза минимума циклов 23–24-го, начавшаяся в мае 2005 г., продлилась до января 2011 г., установив рекорд длительности (6,5 лет) для достоверных солнечных циклов (с 1849 года — середины цикла 9-го). С января 2009 г. начался 24-й цикл CA, и его развитие идёт нормальным темпом, без сюрпризов. Затяжной минимум поставил в повестку дня вопросы исследования характеристик солнечных активных явлений и их отражения в межпланетном пространстве. Последние три года фазы минимума дают возможность оценить и проанализировать солнечные активные явления в условиях минимальной генерации солнечных магнитных полей. Это привело к значимому падению фоновых величин межпланетного магнитного поля, что в свою очередь предопределило 20 % рост уровня галактических космических лучей в гелиосфере и к изменению характеристик радиацион-

ных поясов околоземного космического пространства. Плотность высокоскоростных потоков от солнечных корональных дыр также уменьшилась, что сказалось на их геоэффективности. Исследования показали, что геоэффективность высокоскоростных потоков от солнечных корональных дыр восстановилась не полностью и те КД, которые по своим характеристикам несомненно вызвали малые магнитные бури в 23-м солнечном цикле, в текущем цикле вызывают лишь возмущённую и слабо возмущённую геомагнитную обстановку [Iskov, 2013b].

4. СОЛНЕЧНЫЕ РАДИОВСПЛЕСКИ И ИХ СВЯЗЬ С ЭРУПТИВНЫМИ ЯВЛЕНИЯМИ НА СОЛНЦЕ

Как отмечалось выше для изучения солнечной активности необходимо привлечение данных о проявлениях активности во всём спектре электромагнитных волн. Солнечное радиоизлучение в силу условий выхода и распространения даёт возможность по наземным наблюдениям изучать солнечную атмосферу в широком диапазоне высот от хромосферы до самых внешних слоёв короны. Кроме того, спорадическое радиоизлучение Солнца, будучи связанным с ускоренными частицами, ударными волнами, корональными выбросами плазмы, содержит важную информацию как о процессах энерговыделения во время солнечных вспышек, так и о природе распространяющихся возмущений в солнечной атмосфере. Часто такие наблюдения являются единственными для получения важной информации о магнитных полях в солнечной короне. В последние десятилетия исследования солнечных радиовсплесков в ИЗМИРАН стали проводиться не только в традиционном диапазоне метровых длин волн (на радиоспектрографах в диапазоне 25...280 МГц), но также в микроволновом диапазоне в кооперации с коллегами из Китая и в более низкочастотном (НЧ) диапазоне 1...14 МГц по данным радиоспектрографа WAVES/ RAD2 на КА WIND.

4.1. Тонкая структура радиовсплесков и диагностика солнечной плазмы

Тонкая структура радиовсплесков представляет дополнительный тест для проверки механизмов генерации радиоизлучения и одновременно возможность для уточнения параметров источников. Наибольший интерес у исследователей вызывает, так называемая, зебра — структура, поскольку она является наиболее характерной для солнечных радиовсплесков, но вопрос о её происхождении остаётся дискуссионным. В связи с этим был выполнен анализ данных по тонкой структуре солнечных радиовсплесков во многих событиях. В частности, выполнен анализ наблюдений тонкой структуры на частотах от 25 до 7000 МГц в период высокой активности в октябре-ноябре 2003 г. На частотах 50...65 МГц (ИЗМИРАН) наблюдалась необычные полосы зебры, похожие на волокна. Тонкая структура наблюдалась как в мощных явлениях, так и в слабых, а более богатой была

в слабых явлениях. Вид тонкой структуры зависел от формы магнитных петель в радиоисточнике, от типа ускорения быстрых частиц (импульсное или длительное), от наличия ударных волн и корональных выбросов массы. В этот период обнаружен ряд новых эффектов взаимодействия полос зебры и волокон с пульсациями. В частности, в диапазоне 1...2 ГГц наблюдалось одновременно до 40 волокон с различной полосой частот на фоне внезапных поглощений. Показано, что различные эффекты поведения полос зебра структуры и волокон на фоне быстрых широкополосных пульсаций удаётся объяснить в рамках модели с вистлерами, если учитывать квазилинейную диффузию быстрых частиц на вистлерах, деформирующую функцию распределения частиц по скоростям.

Показано, что зебра структура с большим числом полос была связана с источником в виде аркады петель (данные спутника TRACE), причём максимальная активность зебры совпадала по времени с появлением ярких узлов в скрещенных петлях в виде X-точек магнитного пересоединения. Весь интервал зебры в точности совпадал по времени со всплеском в жёстком рентгеновском излучении, причём новые источники жёсткого рентгена располагались как раз под X-точками (данные RHESSI). Эти новые данные говорят о том, что в динамичной аркаде петель трудно ожидать реализации условий двойного плазменного резонанса (ДПР) (когда верхнегибридная частота равна целому числу электронных циклотронных гармоник) в широком интервале высот (для объяснения одновременных 34 полос зебры).

Выполнен комплексный анализ первых одновременных наблюдений сверхтонкой спайковой структуры полос типа «зебры» в микроволновом диапазоне в двух обсерваториях, разнесённых на ~1000 км, в Пекине и Нанкине (Китайская Народная Республика). В Пекинской обсерватории (BAO) тонкая структура радиовсплеска регистрировалась на спектрографах-поляриметрах в диапазонах 5,2...7,6 и 2,6...3,8 ГГц, а в Нанкине (Purple Mountain Observatory — PМО) на спектрографе в диапазоне 4,5...7,5 ГГц. Положения радиоисточников наблюдались на Сибирском солнечном радиотелескопе (ССРТ) на частоте 5,7 ГГц. Подтверждено солнечное происхождение сверхтонкой структуры полос в виде миллисекундных спайков. Наложение двумерных карт радиоисточников (ССРТ) на магнитные карты SOHO/MDI, позволило определить моду радиоизлучения: во всех случаях она соответствовала необыкновенной волне. В модели зебра структуры, использующей модуляцию излучения вистлерами, частотное разделение между полосами (примерно равное частоте вистлеров) даёт значения $B \approx 250$ Гс для частот ~5,2 ГГц и 120 Гс для 3 ГГц, совпадающие со значениями поля, полученными экстраполяцией в корону фотосферных полей по магнитограммам SOHO/MDI.

В связи с продолжающейся спорной дискуссией о природе жгутов волокон выполнен анализ жгутов узкополосных волокон на спектрах солнечных радиовсплесков в метровом диапазоне волн по данным спектрографов ИЗМИРАН и станции Тремсдорф (Tremsdorf) (Потсдам) с привлечением для общего анализа явлений всех возможных спутниковых данных (SOHO/LASCO, /EIT, /MDI, TRACE, RHESSI). Детально рассмотрены основные свойства жгутов в четырёх явлениях в сравнении с известными ранее

данными. Установлено, что жгуты волокон обычно наблюдаются в интервале времени, когда ударный фронт (даже в отсутствии соответствующего всплеска II типа) догоняет передний край КВМ. При условии единого подхода к интерпретации жгутов волокон во всех явлениях их основные свойства удаётся объяснить в рамках обычной модели образования волокон (fiber bursts) с учётом особенностей параметров плазмы в радиоисточнике. Учёт поведения вистлеров в короне и квазилинейных эффектов при рассеянии вистлеров на быстрых частицах позволяют понять самые тонкие эффекты в жгутах: различные периоды, длительности и полосы частот волокон, образование НЧ-поглощения различного уровня, частотное расщепление.

В дециметровом диапазоне волн на спектрах нового китайского спектрометра (1,0...2,0 ГГц с экстремально высоким разрешением, 5 МГц и 1,5 мс) в четырёх явлениях наблюдались похожие жгуты, но мелкие волокна образовывали крупномасштабные полосы зебра-структуры без заметного поглощения между полосами. Общий анализ явлений показал, что и эти структуры могут создаваться в рамках известных механизмов. Для интерпретации этих явлений впервые удаётся определить вклад излучения электростатических плазменных волн на верхней гибридной частоте на уровнях двойного плазменного резонанса (ДПР) и роль вистлеров, одновременно излучаемых теми же быстрыми частицами с конусным распределением по скоростям. Низкий уровень неустойчивости плазменных волн не создаёт континуума, но в результате их взаимодействия с вистлерами образуются волокна, дрейфующие (в результате движения вистлеров с групповой скоростью) только на уровнях ДПР. Мелкомасштабные волокна наблюдались также в качестве тонкой структуры всплесков III типа и быстрых широкополосных пульсаций. Таким образом, здесь вистлеры служат определённым индикатором очагов низкого уровня возбуждения плазменных волн.

На спектрографе ИЗМИРАН (25...270 МГц) зарегистрировано уникальное явление. 12 февраля 2010 г. наблюдались три больших группы всплесков III типа, и после каждой группы на фоне невысокого континуума появлялась необычная тонкая структура. Согласно данным радиогелиографа Нансэ (Франция), источники всех трёх групп всплесков располагались в одной активной области 11046, и их излучение сопровождалось всплесками в мягком рентгене (GOES). После первой группы всплесков наблюдались классические волокна (fiber bursts) в сочетании с обратнодрейфующими волокнами с необычным дугообразным дрейфом. После третьей (самой мощной) группы наблюдались стабильные секундные пульсации и необычные медленнодрейфующие волокна. Сложные жгуты волокон (типа fiber bursts) наблюдались в самой слабой группе в интервале 09:40:30 — 09:42:00 UT. Одиночные жгуты волокон многократно описывались ранее. Они представляют собой узкополосные (~0,5 МГц) волокна, периодически повторяющиеся в небольшой полосе частот (5...6 МГц) в течение нескольких секунд. В данном явлении наблюдается множество хаотически дрейфующих жгутов, пересекающихся и накладывающихся друг на друга. В полосе частот 185...225 МГц одновременно можно различить до десятка разнообразных жгутов. Кроме того, в отличие от прежних

данных, в каждом жгуте волокна не повторяют друг друга, а следуют почти хаотически по частоте и времени. В этой связи необходимо будет пересмотреть применявшиеся ранее модели. Например, одиночный жгут строго периодических волокон связывался с захватом частиц (ускоренных в ударном фронте) в небольшую ловушку между вторым ударным фронтом или передним краем коронального выброса массы. Такая модель оправдывалась совпадением появления жгутов с моментом пересечения траекторий ударного фронта и КВМ на диаграмме высота/время. Таким образом, в этой модели необходимо предположить существование множества мелких ударных фронтов за передним краем КВМ. Возможно, что такая турбулентная зона действительно могла находиться в хвосте КВМ, если судить по сильно неоднородной структуре на снимках КВМ, полученным в эксперименте STEREO (STEREO Behind COR2).

Для анализа механизма и объяснения сверхтонкой структуры полос ЗС на ДПР проведены расчёты уровней ДПР для различных моделей концентрации и магнитного поля в короне. Расчёты показали, что наличие 34 уровней ДПР в диапазоне частот 2,6...3,8 ГГц можно получить только для модели плазменной частоты, задаваемой барометрической зависимостью и для модели магнитного поля по формуле [Dulk, McLean, 1978], но для искусственно выбранных параметров. Уровни ДПР на частотах ~2,6 ГГц приходятся на 50-е гармоники циклотронной частоты, располагающиеся на высотах в короне ~65...70 тыс. км. Такие высоты в традиционной модели удвоенной концентрации Newkirk [Newkirk, 1961] соответствуют метровому диапазону (~250 МГц). Таким образом, предполагаемые авторами модели не могут быть реальными, что вызывает сомнение в самой интерпретации сверхтонкой структуры в виде периодических пучков электронов (с периодом 30 мс) одновременно на 34 уровнях ДПР. Поэтому был рассмотрен ряд других моделей происхождения тонкой структуры.

В частности, получены дисперсионные уравнения для спектра собственных частот пространственно периодической среды, которая создаётся в плазме солнечной атмосферы благодаря развитию тепловой неустойчивости в виде нелинейных структур. Рассчитан спектр собственных частот таких периодических в пространстве резонаторов и показано, что они способны генерировать десятки полос ЗС, число которых не зависит от соотношения плазменной и гирочастоты в источнике. Это может устранить трудности в объяснении большого числа полос ЗС и малых значений магнитного поля. Рассматриваемая периодическая в пространстве среда является фильтром частот с многочисленными окнами прозрачности, разделёнными друг от друга зонами непрозрачности. Число и частота гармоник зависит от величины пространственного периода неоднородностей, которая для типичных условий солнечной атмосферы составляет метры и декаметры. Высокая яркостная температура радиоизлучения ЗС обеспечивается за счёт когерентного излучения большого числа одинаковых мелкомасштабных структур. Предложено объяснение некоторым наблюдаемым закономерностям ЗС. Актуальность этой работы поддерживается нашими новыми наблюдениями большого числа полос ЗС (до 34 одновременных полос в диапазоне 2,6...3,8 ГГц и до 40 волокон в диапазоне 1...2 ГГц). Причём этот механизм основан на естественном просачивании дискретных частотных

гармоник при распространении радиоизлучения через регулярные тепловые структуры, образование которых является также естественным процессом во вспышечной области.

Новая усовершенствованная модель происхождения ЗС основана на том, что в системе слабoreлятивистский моноскоростной поток протонов — сильно неизотермическая плазма медленная пучковая мода может обладать отрицательной энергией и развивается взрывная неустойчивость при взаимодействии медленной и быстрой пучковых мод и ионного звука. Вследствие слабой пространственной дисперсии генерация ионного звука сопровождается каскадным процессом слияния, и происходит стабилизация взрывной неустойчивости. ЗС образуется при рассеянии быстрых протонов на ионнозвуковых гармониках. Предложенный механизм, основанный на стабилизации взрывной неустойчивости при каскадном нарастании ионнозвуковых гармоник, оказывается значительно эффективнее механизма распадной неустойчивости вистлеров на гармоники ионного звука. Он обеспечивает большое число гармоник ЗС с частотным разделением, не зависящим от соотношения плазменной и циклотронной частот в источнике и растущим с частотой (в соответствии с наблюдениями). При этом не выдвигается никаких дополнительных жёстких условий. Остаётся только условие ускорения моноскоростных пучков слабoreлятивистских частиц, которое обычно реализуется в любой крупной вспышке. Все перечисленные особенности тонкой структуры и их интерпретация описаны в работах (например, [Фомичев и др., 2009; Chernov, 2006; 2011; Chernov et al., 2014]).

4.2. Сравнительный анализ тонкой структуры в метровом и декаметровом диапазонах длин волн

В связи с развитием наблюдений Солнца на КА появилась возможность для наблюдений солнечных радиовсплесков на частотах ниже частоты обрезания ионосферы Земли, т.е. на частотах ниже критической частоты слоя F_2 (10^{-5} МГц). Сразу возник вопрос о свойствах радиовсплесков в этом диапазоне частот, и о тонкой структуре, в частности.

По данным радиоспектрографа ИЗМИРАН на частотах 25–270 МГц и радиоспектрографа WAVES/ RAD2 в диапазоне 1...14 МГц на КА WIND за период 1997–2005 гг. исследован переход тонкой структуры радиовсплесков из метрового диапазона в декаметровый. Кроме обычной клочковатой структуры в радиовсплесках II типа обнаружена волокнистая структура в форме расщепления широких полос всплесков II типа или в континуальном излучении IV типа. Одновременные данные коронографа SOHO/ LASCO C2 показали, что во время появления узких волокон во всех всплесках II типа ударные волны распространялись в хвостах KBM, содержащих мелкомасштабные неоднородности. Вероятным механизмом излучения узких волокон может быть резонансное переходное излучение быстрых частиц, ускоренных во фронтах ударных волн, на границе двух сред с разными показателями преломления [Chernov et al., 2007].

Проведено сравнение тонкой структуры радиоизлучения двух декаметровых всплесков II типа 17 июля и 16 августа 2002 г. наблюдавшихся

с помощью 1000-канального спектрографа УТР-2 (украинский Т-образный радиотелескоп-2) в диапазоне 18,5...29,5 МГц и спектрографа ИЗМИРАН в диапазоне 25...270 МГц. Оба всплеска II типа наблюдались и в межпланетном пространстве на спектрах KA WIND/WAVES RAD2. Анализ соответствующих КВМ по данным SOHO/LASCO C2 показал, что положение радиоисточников всплеска II типа оказывается между узким КВМ и идущим сзади ударным фронтом, догоняющим КВМ. Предполагается, что излучение крупных волокон связано с прохождением ударного фронта через вытянутые неоднородности в хвосте КВМ. Магнитное поле внутри неоднородностей, определённое по параметрам волокон на частоте 24 МГц, получается $\sim 0,9$ Гс, а плотность повышена не менее чем в два раза.

Для радиовсплесков III типа можно считать твёрдо установленным, что генерация радиоизлучения происходит на частоте, близкой к плазменной частоте или её второй гармонике. Это означает, что по динамическому спектру этих всплесков можно получить данные о распределении плотности в солнечной короне. С этой целью был выполнен анализ динамических спектров 37 солнечных радиовсплесков III типа в диапазоне частот 40...400 МГц. Установлено, что центральная частота излучения меняется со временем по закону $f \propto (t - t_0)^{-\alpha}$ со средним и медианным значениями α 1,2 и 0,5 соответственно. Для 84 % событий значение α меньше 1,2. При постоянной скорости электронов это означает, что плотность в короне до высот $\sim 1R_0$ над фотосферой меняется как $(r - r_0)^{-\beta}$ со средним и медианным значениями β 2,4 и 1 соответственно, т.е. типичный профиль плотности в короне является более плавным по сравнению с существующими эмпирическими моделями. В событиях с $\beta \approx 2$ изменение плотности с высотой подобно солнечному ветру, т.е. в соответствии с законом сохранения потока массы в случае малого ускорения плазмы и конической формы потока. Меньшие значения β могут быть связаны с эффектами неконической формы потока, замедления корональной плазмы или кривизны силовых линий магнитного поля. Показано, что эффекты кривизны силовых линий магнитного поля недостаточны для объяснения малых значений β . Установлено также, что для радиовсплесков из одной группы характерны близкие значения β , что подтверждает их связь с одной активной областью на Солнце [Lobzin, et al., 2010].

4.3. Нелинейные процессы и локализованные вспыхивающие структуры

Современные наблюдения на космических аппаратах с высоким пространственным разрешением в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах показывают, что солнечная атмосфера крайне неоднородна и состоит из множества структур разных масштабов: магнитных трубок, контрастных источников и т.п. Это отражает характер диссипации энергии источника нагрева короны, механизм которого пока ещё остаётся дискуссионным. С другой стороны, мелкомасштабные структуры изменяют энергетический баланс короны, интенсивность диссипативных процессов, условия распространения волн, поэтому их следует учитывать, в частности, при интерпретации данных гелиосейсмологии.

Из общих принципов известно, что в открытых системах энергетически выгодны неоднородные состояния типа диссипативных структур. Наиболее изученным является температурный переходный слой, отделяющий горячую корону от холодной хромосферы. С другой стороны, кроме структур типа ПС имеются и другие устойчивые решения уравнения энергетического баланса. Было показано, что в результате вспышечного энерговыделения в магнитной трубке могут происходить как медленные эволюционные изменения исходного температурного распределения ПС, так и структурная перестройка с установлением пространственно локализованных температурных распределений типа солитонов или периодических волн.

Формирование термомагнитных структур свидетельствует об энергетической накачке, что представляет интерес для механизма накопления и высвобождения энергии магнитного поля во время солнечных вспышек. Разнообразные пространственные формы в виде контрастных точечных элементов, полос на солнечном диске, а также локализованные высокотемпературные структуры во вспышечной плазме могут быть проявлением стоячих температурных волн.

Установившиеся во время вспышки в магнитной трубке температурные распределения проанализированы с помощью аналитических решений нелинейного уравнения энергетического баланса с обобщённым источником, включающим нагрев и радиационное охлаждение. Одно из решений типа «кинк» описывает температурный переходный слой хромосфера-корона. Показано, что возможно установление новых локализованных состояний: стоячих волн — устойчивых температурных солитонов или периодических волн, которые связаны со структурной перестройкой температурного потенциала (изменением числа кратных корней). В плоскости, ортогональной магнитному полю получены решения для температурного распределения в магнитной трубке в виде кольцевых структур [Ковалёв, 2010а, б].

4.4 Дифференциальный метод для анализа процессов энерговыделения во время вспышек

Несмотря на значительный прогресс в наблюдениях солнечных вспышек, их механизм пока остаётся дискуссионным: почти любой наблюдательный факт может быть истолкован разными способами. Для верификации моделей вспышек необходимо совершенствование наблюдательных критериев. Для диагностирования типа вспышечного энерговыделения предложен способ, который основан на анализе «характерного времени» $\tau(t)$

$$\tau = \frac{u}{|u'_t|},$$

где $u(t)$ — регистрируемый сигнал, а штрих означает производную по времени. Этот параметр, который может изменяться в пределах $0 \leq \tau < \infty$, характеризует темп энерговыделения.

С целью выяснения характера возбуждения плазменной турбулентности в солнечных вспышках проанализированы данные наблюдений радио-

всплеска 12.02.2010 г. на комплексе аппаратуры ИЗМИРАН. Дифференциальный метод анализа, включающий расчёт логарифмической производной $H = 1/u \cdot du/dt$ измеряемого параметра u , позволил обнаружить во временных профилях потока F (~07:23 UT) радиовсплеска III типа на фиксированных частотах 169 и 204 МГц ускоренные ($|H|$ возрастает) и замедленные ($|H|$ уменьшается) по сравнению с экспоненциальным законом ($H = \text{const}$), режимы. Интервалы с экспоненциальным законом отсутствуют.

На основе энергетического баланса наблюдаемые эффекты связываются с нелинейным характером возбуждения и диссипации плазменных волн. Ускоренный процесс, когда поток и, соответственно, плотность энергии W ленгмюровских волн возрастают по гиперболическому закону (начальная стадия «режима с обострением»), может быть обеспечен преимущественно объёмным источником степенного вида: $\sim W^b$, $b > 1$. Переход к замедленному режиму происходит благодаря «включению» диссипации $\sim -W^a$, $a > b$. Из обнаруженного эффекта двухступенчатого затухания на фазе спада импульса следует, что ускоренный процесс в начале спада может быть обеспечен, если $a < 1$. Переход к замедленному режиму спада указывает на продолжающуюся генерацию плазменной турбулентности. Отсутствие «линейного» режима ($b = 1$) раскачки ленгмюровских колебаний в начале импульса может быть связано, в частности, с его малой длительностью.

Изучены закономерности ускоренного и замедленного по сравнению с экспоненциальным законом поведения вспышечных параметров. Показано, что для наблюдаемого ускоренного нагрева необходим источник с температурной зависимостью $\sim T^b$, $b > 1$. Формирование такого источника возможно при термализации ускоренных за счёт механизма Ферми заряженных частиц в магнитной ловушке, образованной сходящимися перетяжками магнитной трубки. На наличие перетяжек указывают наблюдения локализованных мелкомасштабных структур. Смена режимов связывается с изменением соотношения нагрева и радиационного охлаждения, определяемого динамикой меры эмиссии [Горгуца и др., 2015].

5. ИЗУЧЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ И ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Расчёт магнитного поля в гелиосфере традиционно опирается на следующую процедуру. Всё пространство от Солнца до расчётной точки делится на две части, разделяемые сферической поверхностью, которую принято называть поверхностью источника. Предполагается, что внутри этой области поле имеет потенциальный характер, а во внешней зоне солнечный ветер энергетически сильнее, и потому далее магнитное поле преимущественно направлено вдоль вектора скорости и его величина падает как квадрат расстояния. Оказалось, однако, что простейшая модель с одной поверхностью источника и радиальным расширением неадекватно описывает характеристики спокойного солнечного ветра. Различные подсистемы магнитного поля на Солнце по-разному влияют на характеристики плазмы солнечного ветра, вплоть до изменения знака корреляции. Были разрабо-

таны новые многопараметрические схемы расчёта скорости и компонент магнитного поля в солнечном ветре. При этом при расчёте магнитного поля в солнечном ветре учитывается радиальная компонента магнитного поля в короне Солнца и раствор гелиосферного токового слоя, который определяет степень расхождения силовых линий в гелиосфере. При расчёте скорости солнечного ветра учитывается как расходимость силовых линий в короне, так и величина солнечного магнитного поля. Предложенные схемы обеспечивают значительно более высокую точность расчётов, чем используемые обычно однопараметрические модели, хотя величина магнитного поля всё ещё остаётся несколько ниже, чем непосредственно измеренная. В качестве следующего шага был использован факт, что магнитное поле, переносимое к Земле солнечным ветром, определяется не точкой гелиопроекции, а формируется в обширной зоне как по широте, так и по долготе. Это естественным образом объясняет дефицит значений поля вблизи нейтральной линии (двухвершинность распределения в отличие от одновершинности в точке гелиопроекции). При этом асимметрия распределения межпланетного магнитного поля имеет солнечное происхождение. Знак асимметрии согласуется со знаком асимметрии на Солнце при усреднении по протяжённой области. Однако полностью устранить проблему согласования расчётной величины магнитного с наблюдениями всё-таки не удаётся.

Далее был исследован эффект бимодальности распределения горизонтальных компонент межпланетного магнитного поля B_x и B_y (GSE) или радиальной компоненты Br (RTN) на орбите Земли, имеющих провал в области низких значений поля. До настоящего времени этот факт объяснялся наличием секторной структуры. Полагалось, что это — следствие того, что Земля относительно редко пересекает гелиосферный токовый слой по сравнению со временем своего пребывания в секторе определённого знака (ноль считался в основном свойством секторной границы). Выяснилось, однако, что секторные границы вносят незначительный вклад в число нулей распределения ММП. Существование гелиосферного токового слоя и особенности его топологии не могут целиком объяснять наблюдаемый эффект [Белов и др., 2006; Обридко и др., 2006].

Изучено распределение Br на различных расстояниях от Солнца. Для выявления картины пространственных и временных изменений распределения ММП в плоскости эклиптики были проанализированы данные солнечных магнитографов, OMNI2 и КА Helios 2, Ulysses, Pioneer Venus orbiter, Voyager 1 за период 1977–2009 гг. Обнаружена существенная трансформация вида распределения Br в зависимости от гелиоцентрического расстояния, гелиомагнитной широты и фазы цикла. Распределения магнитного поля на Солнце — строго гауссовы, не имеющие провалов в районе нулевого значения. Эффект двугорбости наиболее ярко выражен на расстоянии 0,7–1 а.е., дальше провал в нуле пропадает (на расстоянии 3...4 а.е. в низких гелиографических широтах и 4...6 а.е. — в высоких). Двугорбость никогда не исчезает в ходе 11-летнего цикла солнечной активности, однако вид распределений претерпевает значительные изменения (в максимуме наблюдается «расширение» гистограмм с опусканием их максимума вследствие влияния активных областей Солнца на состояние межпланетной

среды). Все полученные факты укладываются в гипотезу о наличии трёх распределений, накладывающихся друг на друга — два обусловлены приходом плазмы с обеих полусфер Солнца, а центральное — соответствует теоретически ожидаемому полю, приходящему из приэкваториальных областей.

Выполнен анализ данных космических аппаратов на расстояниях от 1 до 5,4 а.е. в рамках изучения крупномасштабной структуры межпланетного магнитного поля (ММП) в ближней гелиосфере [Хабарова, 2013]. Основное внимание уделено исследованию изменения радиальной компоненты ММП (Br) с расстоянием и широтой по данным КА Ulysses. Обнаружено, что в окрестности плоскости эклиптики ($\pm 10^\circ$ по широте) Br убывает как $r^{-5/3}$, что соответствует результатам, полученным ранее по данным пяти космических аппаратов в плоскости эклиптики [Khabarova, Obridko, 2012a, b]. Разница между экспериментально найденной ($r^{-5/3}$) и повсеместно используемой теоретической зависимостью (r^{-2}) радиальной компоненты ММП от расстояния может приводить к ошибкам при пересчёте величины магнитного поля от точки к точке в гелиосфере. В том числе, это может быть одной из главных причин так называемого «эксцесса магнитного потока» — превышения магнитного потока, вычисленного по данным удалённых космических аппаратов, над потоком, наблюдаемым на орбите Земли.

Показано, что радиальную компоненту ММП можно считать не зависящей от широты лишь при очень грубом приближении. Более детальный анализ демонстрирует выраженное увеличение величины модуля Br и напряжённости ММП в окрестности $\pm 30^\circ$ относительно плоскости эклиптики (рис. 11б). Проведён анализ изменения эффекта бимодальности распределения Br в зависимости от широты и расстояния, подтверждающий превышение величины Br в низких широтах над высокоширотными значениями, измеренными на тех же гелиоцентрических расстояниях. При этом на высоких широтах эффект бимодальности выражен ярче и сохраняется дольше, чем на низких. Исследование не выявило связи между Br и скоростью солнечного ветра V . Между тем, выраженная бимодальность (двувершинность) скоростей V , измеренных Ulysses, есть следствие сильной зависимости V от гелиошироты и фазы цикла солнечной активности. На высоких широтах (выше $\pm 40^\circ$) скорость максимальна в минимуме цикла и минимальна в максимуме.

Таким образом, трудности в расчётах характеристик плазмы солнечного ветра имеют принципиальный характер. Их нельзя устранить простым усовершенствованием методики расчёта в рамках классической паркеровской модели с поверхностью источника.

Процессы формирования солнечного ветра, потоков плазмы, исходящих из солнечной короны, $R = 2,5R_s$, регулярно изучались на основе экспериментов по массовому зондированию межпланетной плазмы вблизи Солнца методом просвечивания в области радиальных расстояний от Солнца $R = 2,5 - 70R_s$, недоступной для прямых исследований с помощью КА (Пушино, радиотелескопы ДКР-1000, $\lambda = 2,7$ м и РТ-22, $\lambda = 1,35$ см), и расчётов магнитных полей в солнечной короне: напряжённости и структуры по измерениям магнитного поля на поверхности Солнца

(солнечная обсерватория Дж. Уилкокса (Wilcox Solar Observatory — WSO), Стэнфордский университет, США), а также изображений белой короны Солнца, полученных на коронографе LASCO, КА SOHO (<http://sohowww.nascom.nasa.gov>). Локализованные (по радиоастрономическим экспериментам) в межпланетном пространстве положения границ переходной, транзвуковой области солнечного ветра: внутренней R_{in} и внешней R_{out} позволили получить серию радиокарт 2006–2011 гг., которые заполнили ранее полученную коллекцию радиокарт струйной структуры солнечного ветра (1997–2005). Радиокарты визуализируют сложную гелиоширотную структуру области формирования сверхзвукового потока: гелиоширотный контур звукового солнечного ветра $R_{in}(\varphi)$ и контур транзвуковой поверхности солнечного ветра $R_{in}(\varphi) - R_{out}(\varphi)$. Радиокарты солнечного ветра позволяют изучить эпохи и циклы 22-го, 23-го в солнечном ветре и начало нового 24-го цикла. В другой модификации метода изучается зависимость положения звуковой точки солнечного ветра от напряжённости и структуры магнитного поля в источнике, в солнечной короне: $R_{in} = F(|B_r|)$, $R = 2,5 R_s$. Корреляционные диаграммы зависимости $R_{in} = F(|B_r|)$ распадаются на дискретные ветви — типы потоков, которые определяются структурой и напряжённостью магнитного поля в источнике. Получены ежегодные спектры типов потока солнечного ветра (1997–2010). Таким образом, показано, что струйная структура солнечного ветра является продолжением структуры солнечной короны.

Предложенные методы использованы в изучении эволюции структуры потока солнечного ветра в 23-м и начале 24-го циклов солнечной активности: 1997–2008 гг. и 2009–2011 гг. Новый подход в изучении природы потоков солнечного ветра позволил воспроизвести сценарий необычной эво-

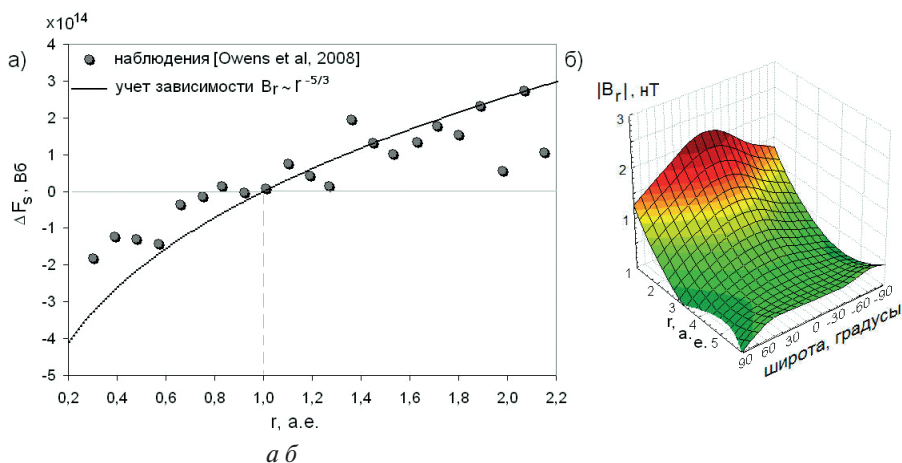


Рис. 11. Демонстрация причины эффекта «экссесса магнитного потока» (а). Точки — разница ΔF_S между магнитным потоком по измерениям удалённых КА и наблюдаемыми значениями на 1 а.е. (теоретически должна быть равна нулю). Кривая — вычисленные значения ΔF_S с учётом экспериментально найденной зависимости $B_r \mu r^{-5/3}$. Радиальная компонента межпланетного магнитного поля (б) в зависимости от расстояния и широты (данные Ulysses за весь период измерений)

люции структуры потоков в эпоху минимума солнечной активности на завершающем этапе 23-го солнечного цикла.

Проводимые в последние годы радиоастрономические исследования солнечного ветра привели к существенным изменениям в представлениях о механизмах формирования сверхзвуковых потоков солнечного ветра. Эти данные позволили выяснить сценарий формирования и развития аномалии в солнечном ветре на завершающем этапе 23-го солнечного цикла. В настоящее время исследования направлены на изучение начальной эпохи 24-го цикла и на изучение механизма воздействия аномалии 23-го цикла на формирование текущего, 24-го цикла солнечной активности. Эксперименты по изучению гелиоширотной структуры потоков солнечного ветра позволят связать ежегодную эволюцию уровня солнечной активности на Солнце (параметр R_z — число солнечных пятен) и общую интенсивность глобального магнитного поля солнечной короны $IBrI$ с эволюцией магнитного поля в источниках потоков (диаграмма $Rin = F(IBrI)$) и с типами потоков солнечного ветра [Лотова и др., 2014].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наши исследования, кратко изложенные выше, развивались в контексте общемировых тенденций в солнечно-земной физике и в тесном сотрудничестве с учёными России, США, Японии, Китая, Франции, Мексики, и ряда других стран. Вполне естественным является то обстоятельство, комплексность исследований обеспечивалось использованием, в основном, данных зарубежных космических экспериментов. Для ликвидации такого отставания в настоящее время в России осуществляется подготовка крупного международного проекта ИНТЕРГЕЛИОЗОНД, предназначенного для исследований внутренней гелиосферы и Солнца с близких расстояний и из внеэклиптических положений на гелиоцентрических орбитах. Описание основных научных целей и задач этого проекта, а также состава комплекса научной аппаратуры, баллистического сценария и рабочих орбит космического аппарата даётся в статье [Кузнецов, 2012]. Здесь мы отметим только два эксперимента, планируемых в этом проекте и являющихся естественным продолжением описанных выше исследований.

Во-первых, это эксперимент TAXOMAG. В рамках этого эксперимента планируется установка на КА многофункционального оптического телескопа «Тахомаг», содержащего спектромагнитограф для прямых измерений полного вектора магнитного поля в солнечной фотосфере с близких к Солнцу расстояний (~60 солнечных радиусов) с высоким пространственным и спектральным разрешением. По своим техническим характеристикам этот комплекс превосходит все действующие на сегодня солнечные магнитографические приборы и позволит решить важную проблему тонкой структуры солнечных фотосферных магнитных полей, а также исследовать магнитные поля в приполярных областях Солнца.

Во-вторых, это эксперимент «Радиоспектрометр-детектор», где планируется установить на оба КА солнечный радиоспектрометр-детектор в широком диапазоне частот — 15 кГц — 300 МГц. Одновременные наблю-

дения всех радиовсплесков всех типов (шумовые бури, всплески I, II, III и IV типов) с двух КА позволят исследовать распространение всех возмущение в солнечной атмосфере (потоки ускоренных частиц, ударных волн, корональных выбросов массы) и их взаимодействия с плазмой солнечной короны и межпланетного пространства. Кроме того, все эти возмущения, достигая окрестности Земли, вызывают целый ряд эффектов (изменение радиационной обстановки, возмущения геомагнитного поля, возмущения атмосферы и ионосферы Земли), которые в настоящее время объединяются понятием «космическая погода». Эти эффекты в свою очередь оказывают существенное влияние на функционирование инженерно-технической инфраструктуры на Земле и на здоровье самих людей. Поэтому наблюдения солнечных радиовсплесков обладают также большим прогностическим потенциалом, так как позволяют проследить за распространением всех геоэффективных агентов на всём пути от Солнца до Земли.

Более подробное описание экспериментов TACHOMAG и «Радиоспектр-детектор» дано в статьях [Обридко и др., 2012; Фомичев и др., 2012].

ЛИТЕРАТУРА

- [Бадалян, 2012] *Бадалян О. Г.* Пространственное распределение N-S-асимметрии солнечной активности и его временные вариации // Письма в Астрон. журн. 2012. Т. 38. С. 51.
- [Бадалян и др., 2005] *Бадалян О. Г., Обридко В. Н., Сикора Ю.* Циклические изменения пространственного распределения яркости зелёной корональной линии // Астрон. журн. 2005. Т. 82. № 6. С. 535–543.
- [Бадалян и др., 2006] *Бадалян О. Г., Обридко В. Н., Сикора Ю.* Циклические вариации дифференциального вращения солнечной короны // Астрон. журн. 2006. Т. 83. № 4. С. 352–367.
- [Белов и др., 2006] *Белов А. В., Обридко В. Н., Шельтинг Б. Д.* Связь характеристик солнечного ветра у Земли с магнитным полем на поверхности источника // Геомагнетизм и аэронавигация. 2006. Т. 46. № 4. С. 456–464.
- [Горгуца и др., 2015] *Горгуца Р. В., Ковалёв В. А., Костюченко И. Г., Маркеев А. К., Соболев Д. С., Фомичев В. В.* Исследование радиовсплеска 12.02.2010 г. дифференциальным методом // Геомагнетизм и аэронавигация. 2015. (принята к печати).
- [Иванов-Холодный и др., 1989] *Иванов-Холодный Г. С., Лотова Н. А., Обридко В. Н., Фельдштейн Я. И., Фомичев В. В.* Солнечно-земная физика: Исследования по физике Солнца в ИЗМИРАН // Электромагнитные и плазменные процессы от Солнца до ядра Земли / Под ред. В. В. Мигулина. М.: Наука, 1989. С. 36–49.
- [Ишков, 2011] *Ишков В. Н.* К вопросу об опасности экстремальных солнечных вспышечных явлений и возможности их прогноза // Вестн. Отделения наук о Земле (Вестн. ОНЗ РАН). Электрон. мультимедийный журн. 2011. Т. 13. № 6. 6 с. URL: http://onznnews.wdcb.ru/news12/info_120106.html.
- [Ишков и др., 1985] *Ишков В. Н., Фомичев В. В., Черток И. М.* Некоторые динамические явления во вспышках со сложной пространственно-временной структурой // Физика солнечных вспышек. М.: Наука, 1985. С. 35–43.
- [Кацова, Лившиц, 2011] *Кацова М. М., Лившиц М. А.* Эволюция активности солнечного типа маломассивных звёзд // Астрон. журн. 2011. Т. 88. № 12. С. 1217–1225.
- [Кичигин и др., 2012] *Кичигин Г. Н., Мирошниченко Л. И., Сидоров В. И., Язев С. А.* Гамма-вспышки на Солнце: Динамика ускоренных ионов в эруптивных

- и пост-эруптивных корональных арках // Солнечно-земная физика. 2012. Вып. 21. С. 79–91.
- [Клепиков и др., 2006] *Клепиков Д. В., Филиппов Б. П., Аджабширизаде А., Платов Ю. В.* Магнитные фокусы полярного поля в цикле солнечной активности // Астрон. журн. 2006. Т. 83. С. 932.
- [Ковалёв, 2010а] *Ковалёв В. А.* Стоячие температурные волны в магнитных трубках на Солнце // Нелинейный мир. 2010. Т. 8. № 8. С. 515–520.
- [Ковалёв, 2010б] *Ковалёв В. А.* О нелинейном источнике нагрева во время солнечных вспышек // Нелинейный мир. 2010. Т. 8. № 11. С. 717–723.
- [Кузнецов, 2012] *Кузнецов В. Д.* Научные задачи проекта ИНТЕРГЕЛИОЗОНД // Проект ИНТЕРГЕЛИОЗОНД: тр. рабочего совещания. Таруса, 11–13 мая 2011 / под ред. В. Д. Кузнецова. 2012. С. 5–14. Сер. Механика, управление и информатика.
- [Куликова и др., 1989] *Куликова Г. Н., Молоденский М. М., Филиппов Б. П.* О структуре магнитных полей активных областей // Астрон. журн. 1989. Т. 66. С. 1271–1283.
- [Куликова и др., 1990] *Куликова Г. Н., Молоденский М. М., Филиппов Б. П.* Определение структуры магнитных полей активных областей в задаче с особыми точками // Астрон. журн. 1990. Т. 67. С. 65–67.
- [Кучми и др., 2001] *Кучми С., Мерзляков В. Л., Молоденский М. М.* О трёхмерной структуре солнечной короны // Астрон. журн. 2001. Т. 78. № 10. С. 953.
- [Лаптухов, Чернов, 2009] *Лаптухов А. И., Чернов Г. П.* К вопросу о механизмах формирования зебра-структуры в радиоизлучении Солнца // Физика плазмы. 2009. Т. 35. № 2. С. 185–193.
- [Лившиц, Обридко, 2004] *Лившиц М. А., Бадалян О. Г.* Связь импульсных и постэруптивных процессов в рентгеновских вспышках на Солнце // Астрон. журн. 2004. Т. 81. № 12. С. 1138–1152.
- [Лившиц, Обридко, 2006] *Лившиц И. М., Обридко В. Н.* Изменения дипольного магнитного момента Солнца в течение цикла активности // Астрон. журн. 2006. Т. 83. № 11. С. 1031–1041.
- [Лившиц и др., 2005] *Лившиц М. А., Чернетский В. А., Митрофанов И. Г., Козырев А. С., Литвак М. Л., Санин А. Б., Третьяков В. И., Бойнтон В., Хамара Д., Шиохара К.* Жёсткие рентгеновские и гамма-всплески на Солнце: стереоскопические эффекты вблизи лимба по наблюдениям на марсианском аппарате «Одиссей» и на околоземных космических аппаратах // Астрон. журн. 2005. Т. 82. С. 1025–1041.
- [Лотова и др., 2014] *Лотова Н. А., Субаев И. А., Корелов О. А.* Формирование установившегося сверхзвукового потока солнечного ветра // Письма в Астрон. журн. 2014. Т. 40. № 10. 6 с.
- [Мирошниченко и др., 2012] *Мирошниченко Л. И., Перес-Пераса Х. А., Веласко-Эррера В. М., Запотитла Х. И., Вашенюк Э. В.* Осцилляции галактических космических лучей и солнечных индексов перед приходом релятивистских протонов от Солнца // Геомагнетизм и аэрономия. 2012. Т. 52. № 5. С. 579–593.
- [Могилевский, 2001] *Могилевский Э. И.* Фракталы на Солнце. М.: Физматлит, 2001. 150 с.
- [Могилевский, Фомичев, 1989] *Могилевский Ю. И., Фомичев В. В.* Исследования по физике Солнца в ИЗМИРАН // Электромагнитные и плазменные процессы от Солнца до ядра Земли / Под ред. В. В. Мигулина. М.: Наука, 1989. С. 15–30.
- [Молоденский, Старкова, 2007] *Молоденский М. М., Старкова Л. И.* О структурах на Солнце, родственных корональным дырам // Астрон. журн. 2007. Т. 84. С. 1146–1152.

- [Молоденский, Филиппов, 1992] Молоденский М. М., Филиппов Б. П. Магнитные поля активных областей Солнца. М.: Наука, 1992. 151 с.
- [Молоденский и др., 1996] Молоденский М. М., Старкова Л. И., Кучми С., Еришов А. В. О трёхмерной структуре солнечной короны // Астрон. журн. 1996. Т. 73. С. 934–938.
- [Молоденский и др., 1990] Молоденский М. М., Старкова Л. И., Филиппов Б. П. Седловые точки магнитных полей в атмосфере Солнца // Астрон. журн. 1990. Т. 67. № 2. С. 622.
- [Молоденский и др., 1991] Молоденский М. М., Старкова Л. И., Филиппов Б. П. Определение параметров магнитных полей пятен по структуре суперполутени // Астрон. журн. 1991. Т. 68. С. 612–623.
- [Никольская, 2005] Никольская К. И. Корональные дыры в цикле активности // Тр. 9-й Международной Пулковской конференции по физике Солнца «Солнечная активность как фактор космической погоды». 4–9 июля 2005, Пулково.
- [Обридо, 2011] Обридо В. Н. Циклы солнечной активности и особенности 23-го цикла // Земля и Вселенная. 2011. Т. 1. С. 3–17.
- [Обридо, Шельтинг, 2003] Обридо В. Н., Шельтинг Б. Д. Меридиональный дрейф крупномасштабных магнитных полей на Солнце // Астрон. журн. 2003. Т. 80. С. 364–373.
- [Обридо, Шельтинг, 2007] Обридо В. Н., Шельтинг Б. Д. Обобщённое правило полярностей солнечных магнитных полей // Астроном. журн. 2007. Т. 84. № 4. С. 380–384.
- [Обридо и др., 2004] Обридо В. Н., Шельтинг Б. Д., Харшиладзе А. Ф. Многопараметрические расчёты параметров солнечного ветра по данным о солнечном магнитном поле // Астрон. вестн. 2004. Т. 38. № 3. С. 261–272.
- [Обридо и др., 2006] Обридо В. Н., Шельтинг Б. Д., Харшиладзе А. Ф. Расчёты магнитного поля в околоземном пространстве по данным о солнечном магнитном поле // Геомагнетизм и аэрномия. 2006. Т. 46. № 3. С. 310–319.
- [Обридо и др., 2012] Обридо В. Н., Кожеватов И. Е., Руденчик Е. А., Куликова Е. Х., Кузнецов В. Д. Многофункциональный оптический телескоп «Тахомаг»: Общее описание // Проект ИНТЕРГЕЛИОЗОНД: тр. рабочего совещания. Таруса, 11–13 мая 2011 / Под ред. В. Д. Кузнецова. 2012. С. 21–26. Сер. Механика, управление и информатика.
- [Ожередов и др., 2009] Ожередов В. А., Бреус Т. К., Обридо В. Н. Сингулярный спектральный анализ в солнечно-земной физике // Fundamental Space Research. Bulgaria, Dec. 2009: Proc. Compt. rend. Acad. bulg. Sci / Ed. D. Danov. 2009. P. 184–188.
- [Осокин и др., 2007] Осокин А. Р., Лившиц М. А., Белов А. В. Источники эффективного ускорения частиц в солнечных вспышках: наблюдательный аспект // Астрон. журн. 2007. Т. 54.
- [Филиппов, 1999] Филиппов Б. П. Нулевые точки магнитного поля в солнечной атмосфере // Астрон. журн. 1999. Т. 76. Вып. 8. С. 628–635.
- [Филиппов, 2009] Филиппов Б. П. Отклонение корональных стримеров от радиального направления в ходе солнечного цикла // Астрон. журн. 2009. Т. 86. С. 611–615.
- [Филиппов, 2007] Филиппов Б. П. Эруптивные процессы на Солнце. М.: Физматлит, 2007. 216 с.
- [Филиппов и др., 2002] Филиппов Б. П., Гопалсвами Н., Ложечкин А. В. Движение эруптивного протуберанца в солнечной короне // Астрон. журн. 2002. Т. 79. № 5. С. 462.

- [Филиппов и др., 2004] *Филиппов Б. П., Платов Ю. В., Аджабширизаде А., Клепиков Д. В.* О геометрии магнитного поля полярных лучевых структур солнечной короны // *Астрон. журн.* 2004. Т. 81. С. 859–864.
- [Филиппов и др., 2006] *Филиппов Б. П., Загнетко А. М., Аджабширизаде А., Ден О. Г.* Некоторые возможности прогнозирования корональных выбросов // *Астрон. вестн.* 2006 Т. 40. С. 350.
- [Фомичев и др., 2009] *Фомичев В. В., Файнштейн С. М., Чернов Г. П.* О возможной интерпретации «зебра»-структуры в солнечном радиоизлучении // *Физика плазмы.* 2009. Т. 35. № 12. С. 1114–1117.
- [Фомичев и др., 2012] *Фомичев В. В., Чернов Г. П., Прутенский И. С., Кузнецов В. Д., Роткель Х., Моравский М.* Радиоизмерения в проекте ИНТЕРГЕЛИОЗОНД (эксперимент РСД) // *Проект ИНТЕРГЕЛИОЗОНД: тр. рабочего совещания.* Таруса, 11–13 мая 2011 / Под ред. В. Д. Кузнецова. 2012. С. 178–192. Сер. Механика, управление и информатика.
- [Хабарова, 2013] *Хабарова О. В.* Межпланетное магнитное поле: зависимость от расстояния и широты // *Астроном. журн.* 2013. Т. 90. № 11. С. 919–925. doi: 10.7868/S0004629913110029.
- [Чернов и др., 2014] *Чернов Г. П., Фомичев В. В., Горгуца Р. В., Маркеев А. К., Соболев Д. Е., Алисандракис К. Е., Хилларис А.* Сложные жгуты волокон в диапазоне 180...270 МГц в явлении 12 февраля 2010 г. // *Геомагнетизм и аэрномия.* 2014. Т. 54. № 4. С. 444–454.
- [Черток, 2008] *Черток И. М.* Солнечные вспышки и корональные выбросы в аспекте космической погоды // *Изменения окружающей среды и климата / Ред. Н. П. Лавёров.* Т. 8. Солнечная активность и физические процессы в системе Солнце-Земля / Ред. Г. А. Жеребцов. М: ИСЗФ СО РАН; ИФЗ РАН, 2008. С. 52–58.
- [Черток и др., 2009] *Черток И. М., Гречнев В. В., Уралов А. М.* Крупномасштабные явления на Солнце, связанные с эрупцией волокон вне активных областей: событие 12.09.1999 // *Астрон. журн.* 2009. Т. 86. № 4. С. 392–405.
- [Ajabshirizadeh, Filippov, 2004] *Ajabshirizadeh A., Filippov B. P.* Spirality of Coronal Rays // *Solar Phys.* 2004. V. 221. Iss. 2. P. 283.
- [Badalyan, Obridko, 2011] *Badalyan O. G., Obridko V. N.* North-South asymmetry of the sunspot indices and its quasi-biennial oscillations // *New Astronomy.* 2011. V. 16. Iss. 6. P. 357–365.
- [Bludova et al., 2014] *Bludova N. G., Obridko V. N., Badalyan O. G.* The Relative Umbral Area in Spot Groups as an Index of Cyclic Variation of Solar Activity // *Solar Physics.* 2014. V. 289. Iss. 3. P. 1013–1028. doi: 10.1007/s11207-013-0370-0.
- [Bochkarev et al., 2011] *Bochkarev N. G., Gershberg R. E., Livshits M. A.* Scientific legacy of S. B. Pikel'ner and today's astronomy // *Astronomical and Astrophysical Transactions (AAPT).* 2011. V. 27. Iss. 1. P. 1–21.
- [Borovik et al., 2005] *Borovik V. N., Grehnev V. V., Bugaenko O. I., Bogachev S. A., Grigorieva I. Y., Kuzin S. V., Lesovoi S. V., Livshits M. A., Pertsov A. A., Rudenko G. V., Slemzin V. A., Stepanov A. I., Shibasaki K., Uralov A. M., Zandanov V. G., Zhitnik I. A.* Observations of a posteruptive arcade on October 22, 2001 with CORONAS-F, other spaceborne telescopes, and in microwaves // *Coronal and Stellar Mass Ejections: Proc. IAU Symposium.* No. 226 / Intern. Astronomical Union; Eds. K. Dere, J. Wang, Y. Yan. Cambridge Univ. Press, 2005. P. 108–109.
- [Chernov, 2006] *Chernov G. P.* Solar radio bursts with drifting stripes in emission and absorption // *Space Sci. Rev.* 2006. V. 127. P. 195–326.
- [Chernov, 2011] *Chernov G. P.* Fine Structure of Solar Radio Bursts. Springer ASSL 375, 2011. 297 p. doi: 10.1007/978-3-642-20015-1.

- [Chernov et al., 2007] *Chernov G. P., Kaiser M. L., Bougeret J.-L., Fomichev V. V., Gorgutsa R. V.* Fine structure In solar radio bursts observed at decametric and hectometric waves // *Solar Phys.* 2007. V. 241. P. 145–169.
- [Chernov et al., 2014] *Chernov G. P., Fomichev V. V., Tan B. L., Yan Y. H., Tan Ch. M., Fu Q. J.* Dynamics of flare processes and variety of the fine structure of solar radio emission over a wide frequency range of 30...7000 MHz // *Solar Physics.* 2014. V. 289. No. 11. P. 1–25.
- [Chertok et al., 2013] *Chertok I. M., Grechnev V. V., Belov A. V., Abunin A. A.* Magnetic Flux of EUV Arcade and Dimming Regions as a Relevant Parameter for Early Diagnostics of Solar Eruptions — Sources of Non-Recurrent Geomagnetic Storms and Forbush Decreases // *Solar Phys.* 2013. V. 282. P. 175–199.
- [Chertok et al., 2014] *Chertok I. M., Abunina M. A., Abunin A. A., Belov A. V., Grechnev V. V.* Relationship between the Magnetic Flux of Solar Eruptions and the Ap index of Geomagnetic Storms // *Solar Phys.*, accepted, 2014.
- [Dulk, McLean, 1978] *Dulk G. A., McLean D. J.* Coronal magnetic fields // *Solar Phys.* 1978. V. 57. P. 279–295.
- [Filippov, 1996] *Filippov B. P.* Coronal mass ejections caused by filament eruptions // *Astron. Astrophys.* 1996. V. 313. P. 277.
- [Filippov, 2013] *Filippov B. P.* Electric current equilibrium in the corona // *Solar Physics.* 2013. V. 283. P. 401.
- [Filippov, Den, 2001] *Filippov B. P., Den O. G.* A critical height of quiescent prominences before eruption // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P. 25,177–25,184.
- [Filippov et al., 2001] *Filippov B. P., Gopalswamy N., Lozhechkin A. V.* Non-radial motion of eruptive filaments // *Solar Phys.* 2001. V. 203. P. 119–130.
- [Filippov, Koutchmy, 2002] *Filippov B. P., Koutchmy S.* About the prominence heating mechanisms during its eruptive phase // *Solar Phys.* 2002. V. 208. P. 283–295.
- [Filippov, Srivastava, 2010] *Filippov B., Srivastava A. K.* Deflection of Coronal Rays by Remote CMEs: Shock Wave or Magnetic Pressure? // *Solar Phys.* 2010. V. 266. Iss. 1. P. 123–134.
- [Gao et al., 2013] *Gao Y., Sakurai T., Zhang H., Kuzanyan K. M., Sokoloff D.* Statistical distribution of current helicity in solar active regions over the magnetic cycle // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* 2013. V. 433. Iss. 2. P. 1648–1658
- [Grechnev et al., 2008] *Grechnev V. V., Kurt V. G., Chertok I. M., Uralov A. M., Nakajima H., Altyntsev A. T., Belov A. V., Yushkov B. Y., Kuznetsov S. N., Kashapova L. K., Meshalkina N. S., Prestage N. P.* The extreme solar event of 20 January 2005: properties of the flare and origination of energetic particles // *Solar Phys.* 2008. V. 252. Iss. 1. P. 149–177.
- [Gulyaev, 1992] *Gulyaev R. A.* The solar corona: flat formation // *Solar Phys.* 1992. V. 142. P. 213–216.
- [Ioshpa et al., 2006] *Ioshpa B., Mogilevski E., Obridko V., Rudenchik E.* The fractal properties of sunspot magnetic structure // *Proc. JENAM 2004. The Many Scales in the Universe* / Ed. J. C. del Toro Iniesta, E. J. Alfaro, J. G. Gorgas, E. Salvator-Sole, H. Butcher. Dordrecht. Netherland: Springer, 2006. 4 p.
- [Ioshpa et al., 2007] *Ioshpa B., Mogilevski E., Obridko V., Rudenchik E.* Some structural Properties of Solar Magnetic Fields // *Proc. Coimbra Solar Physics Meeting.* 9–13 Oct. 2006. Astronomical Society of the Pacific, ASP Series. 2007. P. 245–246.
- [Ishkov, 2013a] *Ishkov V. N.* Complex Active Regions as the Main Source of Extreme and Large Solar Proton Events // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2013. V. 53. No. 8. P. 1–6.
- [Ishkov, 2013b] *Ishkov V. N.* The Sun near of the solar cycle 24 maximum: the geoeffective flare phenomena, the evolution and the development forecast // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2013. V. 409. doi: 10.1088/1742-6596/409/1/012167.

- [Ishkov et al., 1985] *Ishkov V. N., Chertok I. M., Chernov G. P., Fjmichev V. V., Markeev A. K., Pisarenko N. F., Likin O. B., Farnik F., Tlamicha A., Karlicky M., Valnichek B., Kalman B.* Analysis of the flare of May 16, 1981 with a complex space-time structure using optical, X-ray and radio observations // *Bull. Astr. Inst. Czechoslovakia*. 1985. V. 36. No. 2. P. 81–97.
- [Ivanov, 2003] *Ivanov E. V.* Dynamics of Active Longitudes as Inferred from Sunspot Observations // *Proc. ISCS 2003 Symp. “Solar Variability as an Input to the Earth’s Environment”*. Tatranska Lomnica, Slovakia, 23–28 June 2003 (ESA SP-535, Sept. 2003). 2003. P. 105–108.
- [Ivanov, Obridko, 2002] *Ivanov E. V., Obridko V. N.* The Role of Solar Magnetic Field Systems in Modulating the Solar Irradiance // *Advances in Space Research*. 2002. V. 29. No. 12. P. 1951–1956
- [Ivanov et al., 2003] *Ivanov E. V., Obridko V. N., Shelting B. D.* The Role of Meridional Circulation in Generating the 22-year Solar Cycle // *Proc. ISCS 2003 Symp. “Solar Variability as an Input to the Earth’s Environment”*. Tatranska Lomnica, Slovakia, 23–28 June 2003 (ESA SP-535, Sept. 2003). 2003. P. 37–42.
- [Khabarova, Obridko, 2012a] *Khabarova O., Obridko V.* Puzzles of the Interplanetary Magnetic Field in the Inner Heliosphere // *Astrophysical J.* 2012. V. 761. Iss. 1. 10 p. doi: 10.1088/0004-637X/761/1/1.
- [Khabarova, Obridko, 2012b] *Khabarova O., Obridko V.* Puzzles of the Interplanetary Magnetic Field in the Inner Heliosphere // *Astrophysical J.* 2012. V. 761. Iss. 2. 82 p. doi: 10.1088/0004-637X/761/2/82. URL: <http://arxiv.org/pdf/1204.6672v2.pdf>.
- [Koutchmy et al., 1996] *Koutchmy S., Ershov A. V., Molodenskii M. M.* On the three-dimensional structure of the solar corona // *Astron. Rep.* 1996. V. 40. P. 109.
- [Kuzanyan et al., 2006] *Kuzanyan K. M., Pipin V. V., Seehafer N.* The Alpha Effect and the Observed Twist and Current Helicity of Solar Magnetic Fields // *Solar Physics*. 2006. V. 233. Iss. 2. P. 185–204.
- [Li et al., 2013] *Li C., Firoz K. A., Sun L. P., Miroshnichenko L. I.* Electron and Proton Acceleration during the First GLE Event of Solar Cycle 24 // *Astrophys. J.* 2013. V. 770. No. 34. 11 p. doi: 10.1088/0004-637X/770/1/34.
- [Lobzin et al., 2010] *Lobzin V. V., Cairns I. H., Robinson P. A., Warmuth A., Mann G., Gorgutsa R. V., Fomichev V. V.* Evidence for gently sloping plfmsa density profiles in the deep corona: Type III obseravations // *Astrophysical J.* 2010. V. 724. P. 1099–1107.
- [Makarov, Filippov, 2003] *Makarov V. I., Filippov B. P.* Polar ring currents on the Sun during a polar magnetic field reversal // *Solar Phys.* 2003. V. 214. P. 55.
- [Miroshnichenko, Gan, 2012] *Miroshnichenko L. I., Gan W. Q.* Particle Acceleration and Gamma-Rays in Solar Flares: Recent Observations and New Modeling // *Advances in Space Research*. 2012. V. 50. P. 736–756. doi: 10.1016/j.asr.2012.04.024.
- [Miroshnichenko, Perez-Peraza, 2008] *Miroshnichenko L. I., Perez-Peraza J.* Astrophysical Aspects in the Studies of Solar Cosmic Rays (Invited Review) // *Intern. J. Modern Physics A (IJMPA)*. 2008. V. 23. No. 1. P. 1–141.
- [Mogilevsky et al., 2005] *Mogilevsky E. I., Obridko V. N., Shilova N. S.* On the probable model of Solar flomers loased on avalanche of self-organized criticality with energy and metertransport by magnetohydrodynamic solitons // *Astron. and Astrophys. Transection*. 2005. V. 24. No. 1. P. 25–33.
- [Newkirk, 1961] *Newkirk G. (Jr.)* The solar corona in active regions and the thermal origin of the slowly varying component of solar radio radiation // *Astrophys. J.* 1961. V. 133. P. 983–1013.
- [Obridko, Shelting, 2001] *Obridko V. N., Shelting B. D.* Rotation characteristics of large-scale solar magnetic field // *Solar Phys.* 2001. V. 201. V. 1. 12 p.

- [Obriadko, Shelting, 2007] *Obriadko V. N., Shelting B. D.* Occurrence of the 1.3-year periodicity in the large-scale solar magnetic field for 8 solar cycles // *Advances in Space Research*. 2007. V. 40. P. 1006–1014.
- [Obriadko, Shelting, 2011] *Obriadko V. N., Shelting B. D.* Relationship between the Parameters of Coronal Holes and High-Speed Solar Wind Streams over an Activity Cycle // *Solar Physics*. 2011. V. 270. Iss. 1. P. 297–310.
- [Obriadko et al., 2005] *Obriadko V. N., Sokoloff D. D., Kuzanyan K. M., Shelting B. D., Zakharov V. G.* Solar cycle according to mean magnetic field data // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2005. V. 365. Iss. 3. P. 827–832.
- [Obriadko et al., 2009] *Obriadko V. N., Shelting B. D., Livshits I. M., Asgarov A. B.* Contrast of Coronal Holes and Parameters of Associated Solar Wind Streams // *Solar Physics*. 2009. V. 260. No. 1. P. 191–206.
- [Obriadko et al., 2011] *Obriadko V. N., Chertoprud V. E., Ivanov E. V.* ‘Active Longitudes’ in the Heliomagnetic Reference Frame // *Solar Phys.* 2011. V. 272. P. 59–71. doi: 10.1007/s11207-011-9813-7.
- [Obriadko et al., 2014] *Obriadko V. N., Chertoprud V. E., Kuzanyan K. M.* North-South Asymmetry in the Distribution of Solar Background Magnetic Field // *Solar Physics*. 2014. V. 289. Iss. 8. P. 2867–2878. doi: 10.1007/s11207-014-0518-6.
- [Pipin et al., 2014] *Pipin V. V., Moss D., Sokoloff D., Hoeksema J. T.* Reversals of the solar magnetic dipole in the light of observational data and simple dynamo models // *Astronomy and Astrophysics*. 2014. V. 567. A90. 8 p.
- [Zhang et al., 2005] *Zhang H., Sokoloff D., Rogachevskii I., Moss D., Lambart V., Kuzanyan K., Kleorin N.* The radial distribution of magnetic helicity in the solar convective zone: observations and dynamo theory // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2005. V. 365. Iss. 1. P. 276–286.

RESEARCH IN THE PHYSICS OF THE SUN AND SOLAR-TERRESTRIAL RELATIONS

V. V. Fomichev, V. N. Obriadko, B. P. Filippov

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of Russian Academy of Sciences (IZMIRAN)

The paper briefly describes the results of solar and solar-terrestrial studies obtained at IZMIRAN during the past 25 years. In particular, much attention is paid to the study of the dynamics of solar magnetic fields of various spatial scales, manifestations of solar activity in different ranges of the electromagnetic spectrum (UV, X-ray, and radio emissions) and their relation to geophysical phenomena, as well as the solar wind characteristics and their cycle variations.

Keywords: Solar activity, magnetic fields, solar flares, coronal mass ejection, solar wind.

Fomichev Valery Viktorovich — deputy director, doctor of physical and mathematical sciences, fomichev@izmiran.ru

Obriadko Vladimir Nukhimovich — head of department, doctor of physical and mathematical sciences, professor, obriadko@izmiran.ru

Filippov Boris Petrovich — head of laboratory, doctor of physical and mathematical sciences