

## ГЕЛИОСФЕРА И СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР В МАКСИМУМЕ 23-ГО ЦИКЛА

И.С. Веселовский

В кратком обзоре рассмотрены некоторые актуальные вопросы экспериментальных и теоретических исследований, в основном связанных с нелинейной и нелокальной динамикой взаимодействующих структур в широком диапазоне пространственных и временных масштабов в гелиосфере при высокой активности Солнца, с переполновкой общего магнитного поля и динамикой ионного состава солнечного ветра.

### Введение

Фаза нарастания текущего 23-го солнечного цикла развивалась сходно с 20-м циклом. Это дало некоторые основания полагать, что активность Солнца, измеренная числом солнечных пятен, в максимуме данного солнечного цикла будет ниже, чем в 21 и 22 солнечных циклах, а сам цикл окажется несколько длиннее, чем каждый из этих двух предыдущих циклов. Динамика изменения основных гелиосферных параметров в 23-м солнечном цикле в целом, по-видимому, следует этим теоретическим и эмпирическим ожиданиям. Однако следует отметить, что число пятен не является единственным и достаточно однозначным параметром для оценки состояния гелиосферы [1, 2].

Целью данного краткого обзора является попытка на ряде примеров обосновать следующую точку зрения на современное состояние исследований гелиосферных процессов при высокой активности Солнца: 1) космические аппараты и наземные наблюдения дают богатый фактический материал для изучения отдельных наиболее важных характеристик магнитных полей и плазмы в гелиосфере; 2) существующие теоретические методы описания, основанные на магнитогидродинамическом и кинетическом подходах, вполне адекватны рассматриваемым явлениям; 3) имеющиеся трудности и нерешенные проблемы частично связаны с отсутствием достаточно полных сведений о рассматриваемых процессах, а частично – с объективной сложностью их математического моделирования; 4) весьма полезными, к сожалению, мало используемыми до настоящего времени являются анализ и классификация событий и структур на основе объективных критериев и оценок безразмерных параметров.

### Нелокальные взаимодействия в гелиосфере

Электрические токи и магнитные поля связывают между собой различные участки на Солнце и в гелиосфере весьма сложным и тесным образом. Электродинамическое и плазменное взаимодействие между отдельными элементами морфологических структур изучено все еще недостаточно полно, что довольно часто служит почвой для искаженных представлений, а порой просто ошибочных и необоснованных попыток интерпретации тех или иных наблюдений. Особенно следует отметить весьма стойкий характер заблуждений, ставших в некоторой степени традиционными для данной области

исследований и связанных с субъективными оценками наиболее ярких или заметных локализуемых образований на Солнце (вспышки, волокна, корональные дыры, активные области, стримеры и т.п.) как «причин» и «источников» различных возмущений в гелиосфере.

В действительности же эти локальные морфологические образования на интересующих пространственных и временных масштабах, как правило, представляют собой существенно открытые системы, обменивающиеся с окружающей их средой массой, импульсом и энергией, а вовсе не изолированные или адиабатические подсистемы. Короче говоря, то, что часто именуется «причиной», фактически оказывается всего лишь «диагностическим признаком». Приведем несколько примеров таких связей.

#### *А) Протуберанцы и волокна.*

Проблема «поддержания» долгоживущих протуберанцев исторически возникла довольно давно. Она и по сей день служит предметом активных теоретических и экспериментальных исследований. Не менее актуальна задача адекватного описания эруптивных протуберанцев. Традиционной (и, по-видимому, принципиально ошибочной в большинстве реализованных теоретических построений) отправной точкой служит поиск подходящего «равновесного» состояния в первом случае и «неустойчивости» – во втором. Волокно или протуберанец часто выступают при таком рассмотрении как локализованные массы относительно холодного газа, изолированного и удерживаемого магнитным полем на корональных высотах после некоторого первоначального процесса накопления в магнитной ловушке.

В действительности же очень важно, что указанная магнитная ловушка, как правило, является сильно открытой – вещество в ней многократно обновляется за время ее существования. Детальные космические наблюдения последнего времени и более внимательный анализ накопленного ранее не менее убедительного материала, ставшего уже, по существу, классическим, но частично забытым наследием многолетних наземных наблюдений, обнаруживает многомасштабность сложной динамической внутренней структуры волокон и протуберанцев.

Полезными безразмерными параметрами для количественной оценки степени нелокальности процессов и открытости системы могут служить наборы так называемых «триестских чисел» ( $T$ ). Числа  $T$  определяются как отношения «внутренних» потоков

(массы, импульса или энергии) к «внешним» входящим, выходящим или проходящим потокам на границах рассматриваемого объекта или системы. Ясно, что таким образом определенные комбинации четко и однозначно отделяют мир хорошо изолированных систем ( $T \gg 1$ ) от мира полностью открытых систем ( $T \ll 1$ ) как в смысле обмена энергией, импульсом, так и массой. Применительно к спокойным волокнам и протуберанцам ( $T \sim 1$ ) следует сказать, что они занимают промежуточное положение в этой иерархии и представляют собой существенно открытые динамические системы или (что то же самое) далеко не полностью изолированные образования. Такое же заключение следует сделать и относительно так называемых корональных выбросов массы при рассмотрении их эволюции в гелиосфере. Иницирование зруптивных процессов в большинстве случаев может быть понято лишь при учете «открытости» подлежащих анализу корональных структур, а не с использованием представлений о равновесии каких-либо изолированных структур, теряющих свою устойчивость вследствие развития тех или иных неустойчивостей, хотя и эти локальные процессы, несомненно, играют свою важную роль. Предстоит еще понять многие аспекты нелокальных связей на Солнце и в гелиосфере, в особенности при высокой активности, с тем чтобы адекватно отразить их в виде начальных и граничных условий при модельном описании.

#### *Б) Продольные электрические токи в гелиосфере.*

Спиральные и скрученные магнитные структуры во внутренней гелиосфере, магнитные жгуты в корональных транзитах и полярных плюмах свидетельствуют о протекании значительных продольных электрических токов, величина которых в отдельных элементах оценивалась неоднократно.

Эти токи достигают порядка  $10^{12}$  А и осуществляют, например, нелокальную электродинамическую связь полярных участков гелиосферы с экваториальным токовым слоем. Они же участвуют в качестве связующих звеньев между гелиосферой и межзвездной средой, образуя единую электрическую цепь с токами на границах гелиосферы, впервые указанную Альфвеном и развитую в дальнейшем [3, 4].

Существование гелиосферного токового слоя вблизи магнитного экватора Солнца и радиальная направленность полярных плюмов на больших расстояниях от Солнца оказываются тесно связанными друг с другом и со структурой стримеров именно благодаря отмеченному обстоятельству [5]. Происхождение продольных электрических токов в гелиосфере может быть взаимно связано как с процессами разделения заряда, образованием двойных электрических слоев, так и с замыканием поперечных индукционных токов в переменных магнитных полях.

Полезным безразмерным параметром, характеризующим относительную роль электростатических и вихревых электрических полей, является число Фарадея,  $F = \frac{j r}{r c t}$  где  $j$  - плотность электрического

поля,  $\rho$  - плотность заряда,  $r$  и  $t$  характеристические пространственные и временные масштабы. При  $F \gg 1$  преобладают индукционные поля, тогда как в противоположном предельном случае главную роль играют потенциальные поля. Этот последний случай (мелкие масштабы) требует самого внимательного изучения применительно к условиям на Солнце и в гелиосфере.

#### *В) Взаимное соподчинение мелкомасштабных кинетических структур и крупномасштабных гидродинамических образований.*

Расположение и динамика тонких гелиосферных токовых слоев и электроджетов зависит от внешних параметров плазмы и магнитных полей, которые, в свою очередь, определяются условиями на границах «разрывов». Соответствующие задачи настолько тесно связаны между собой, что в гелиосфере порой нет особого смысла выделять «крупномасштабную причину» и искать мелкомасштабные следствия или поступать наоборот – искать локальную мелкомасштабную «причину» и рассуждать о ее крупномасштабных следствиях. Причинно-следственные связи здесь далеко не столь простые и непосредственные. Прямые и обратные турбулентные энергетические каскады сосуществуют в пространстве и во времени, что, собственно, и делает гелиосферную динамику столь интересной и разнообразной, но в то же время и трудной для изучения.

При характеристике нестационарных процессов в гидродинамике принято использовать термин «квазистационарный» только в случае  $S = L/vt \ll 1$ , где  $S$  – число Штрухала,  $L$  – характерный пространственный масштаб,  $v$  – характерная скорость,  $t$  – временной масштаб изменений. При этом условии допустимо пренебрежение инерцией. В противоположном предельном случае  $S \gg 1$  этого делать нельзя и процесс носит динамический, транзиентный характер. В гелиосфере встречаются оба крайних случая, а также и промежуточные режимы.

#### **Переполюсовка магнитного поля в гелиосфере**

Глобальные и локальные магнитные поля на Солнце в своем изменении полярности следуют известному магнитному циклу Хейла, который в среднем длится 22 года. Потенциальная часть поля вокруг Солнца представляется набором большого числа гармоник, определенным образом изменяющихся во времени. Непотенциальная часть связана с протеканием объемных электрических токов, наиболее сильные из которых сконцентрированы в относительно тонких токовых слоях и электроджетах, часть из которых носит конвективный характер (тангенциальные разрывы, равновесные по давлению магнитно-плазменные структуры пинчевого типа), а другая часть представляет собой распространяющиеся волновые образования нелинейного типа (ударные волны, альфвеновские разрывы и т.п.). Эквивалентная токовая система в гелиосфере включает в себя все эти элементы и образует своеобразный «скелет»

мозаичной гелиосферной структуры, состоящей из отдельных плазменных и магнитных доменов, ограниченных друг от друга резкими границами, для количественного описания которых необходимо использовать кинетический подход. Геометрический узор этой мозаики из двух секторов относительно прост и хорошо известен в годы низкой солнечной активности.

Описание этой структуры в годы высокой солнечной активности в целом представляет большие трудности именно из-за геометрической сложности и ее переменности во времени. Обычно в максимуме солнечной активности в гелиосфере присутствует целое множество отдельных или перекрывающихся друг с другом возмущений сравнимой мощности. Однако в исключительных случаях доминирует одно или несколько наиболее сильных возмущений с той или иной локализацией по времени и пространству и бывает оправданным пренебрежение всеми другими более слабыми возмущениями. В качестве примера можно указать мощные межпланетные ударные волны после уникальных вспышек на Солнце. Другой пример связан с распространением волны переполосовки гелиосферного магнитного поля.

В общем же возможности динамического подхода ограничены присутствием сильных флуктуаций, имеющих как солнечное происхождение, так и зарождающихся в самой гелиосфере из-за имеющейся там значительной свободной энергии для развития различных неустойчивых процессов, требующих для своего описания статистических методов. Уровень информационной энтропии и хаотизации всех гелиосферных параметров несколько меняется в ходе солнечного цикла, оставаясь всегда относительно высоким [6]. Тем не менее, возможность выделения целого ряда регулярных процессов на этом фоне существует даже при самой высокой активности и всегда представляет интерес с точки зрения определения горизонтов прогнозирования, которые в настоящее время весьма неопределенны и требуют тщательного анализа.

Дипольная составляющая магнитного поля Солнца начала быстро изменять свое направление в 1999 г., постепенно все больше отклоняясь от оси вращения Солнца. В июле того же года вектор магнитного диполя впервые пересек экваториальную плоскость Солнца и затем довольно долго (на протяжении около двух лет) колебался в направлении  $30\text{--}50^\circ$  уже в южной полусфере [7]. Соответственно этому на космическом аппарате ULYSSES все это время наблюдались сильно деформированная секторная структура и переменный солнечный ветер с примерно одинаковыми общими характеристиками, как на низких, так и на высоких широтах. Гелиосферная конфигурация в целом определяется наклоном гелиосферного токового слоя относительно оси вращения Солнца. В максимуме активности 23-го цикла можно было даже усмотреть некоторое соответствие между положением приблизительно анти-

подальных корональных дыр противоположной полярности и положением магнитных полюсов, находившихся в это время в указанной ранее низкоширотной зоне. В текущем цикле переполосовка в гелиосфере развивалась явно по медленному сценарию [8].

#### **Ионный состав солнечного ветра**

Основной наблюдательный материал о составе ионов в гелиосфере в настоящее время получается приборами на аппаратах «ACE» и «SOHO». В 2001 г. был запущен спутник, снабженный электромагнитным концентратором и специальными коллекторами для сбора имплантированных ионов при длительной экспозиции в течение 2–3 лет за пределами магнитосферы. По своему замыслу эта миссия («Genesis») продолжает более кратковременные эксперименты, выполненные на Луне с возвращаемыми на Землю алюминиевыми фольгами по программе «Apollo» около тридцати лет назад. Ожидается, что проведение подобного «контрольного» эксперимента поможет лучше понять детали изотопного состава, необходимые для изучения вопросов, связанных с происхождением Солнечной системы, и получаемые обычно из анализа образцов лунного грунта, метеоритов, кометного вещества и других носителей космохимической информации. Необходимо отметить значительные экспериментальные трудности подобного масс-спектрометрического анализа и остающуюся неоднозначность их возможной интерпретации, которая может быть сделана лишь с большой осторожностью после тщательного устранения не до конца оцененных в настоящее время искажающих факторов, связанных с работой коллекторов и концентратора. Кроме того, необходимо иметь в виду, что эксперимент охватывает период времени на спаде текущего солнечного цикла. Экстраполяция на другие временные интервалы представляется трудной задачей, для решения которой придется использовать те или иные модельные представления о степени переменности и ионного состава солнечного ветра.

Изменчивость ионного состава солнечного ветра обусловлена как регулярными крупномасштабными структурами, так и быстро меняющимися транзитными процессами на Солнце и в гелиосфере, играющими особенно заметную роль в периоды высокой активности. Для ознакомления с современным состоянием относящихся сюда экспериментальных и теоретических исследований удобно обратиться к материалам недавней конференции «Solar and Galactic Composition, Bern, Switzerland, March 6–9, 2001». Можно констатировать значительный рост объема информации о многообразии возможных вариаций ионного состава солнечного ветра, о различии в составе быстрых и медленных потоков из квазистационарных и транзиентных источников на Солнце, о весьма резких границах между ними, свидетельствующих об ограниченном перемешивании

между отдельными доменами гелиосферной плазмы. В то же самое время следует отметить недостаточный уровень понимания и описания этих вариаций.

Требуется своего количественного истолкования тот простой наблюдательный факт, что концентрация протонов в солнечном ветре всегда без исключения выше концентрации остальных ионов. С одной стороны, это неудивительно, поскольку водород – наиболее обильный элемент Солнца. С другой стороны, на Солнце и особенно в гелиосфере работает целый ряд мощных процессов ионной сепарации, которым противостоят процессы диффузии и механического перемешивания. Остаются не вполне понятными многие особенности вариаций в ионном составе солнечного ветра, которые при более детальном изучении могли бы, по-видимому, служить важными диагностическими признаками, по которым можно было бы судить об источниках гелиосферной плазмы на Солнце.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 01-02-16579 и 00-15-96623), Федеральной программы «Астрономия» (проект 1.5.6.2), программы «Университеты России» (грант 99-0600) и INTAS-ESA (грант 99-00727).

#### **Выводы**

1. Важная особенность гелиосферных явлений состоит в их нелокальности и многомасштабности во времени и в пространстве.

2. Имеется реальная опасность необоснованной и субъективной оценки роли различных наиболее заметных диагностических признаков при попытках локализации «причин» геоэффективных событий на Солнце и в гелиосфере.

3. Необходимы дальнейшие фундаментальные исследования параллельно с попытками прогноза и поисками горизонтов предсказуемости в эволюции гелиосферных параметров.

#### *СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ*

1. Веселовский И.С., Дмитриев А.В., Суворова А.В. Плазма и магнитные поля в гелиосфере на фазе роста 23-го солнечного цикла: сравнение с предыдущими циклами // *Астрон. Вестник*. 2001. Т.35. №3, С.262-266.
2. Веселовский И.С., Тарсина М.В. Угловое распределение вектора межпланетного магнитного поля. // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2001. Т.41. № 4, С.471-476.
3. Alfven H. *Cosmic Plasma*. Dordrecht: D.Reidel Publ. Co., 1981.
4. Veselovsky I.S. Field-aligned electric currents in the heliosphere // *Proc. 9th European Meeting on Solar Physics*, ESA-SP-448. 1999. P.1217-1222.
5. Veselovsky I.S., Panassenko O.A. Magnetic coupling between polar plumes and the heliospheric current sheet // *Adv. Space Res.* 2000. V. 26, N5. P. 819-820.
6. Веселовский И.С. и др. Моделирование статических распределений в пространстве параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля с использованием искусственных нейронных сетей. // *Астрон. вестник*. 2000. Т. 34, N2. С.131-138.

7. Zhukov A.N., Veselovsky I.S. Analysis of the magnetic field reversal during the current solar cycle // *Proc. 1st Solar and Space Weather Euroconference*. ESA Sp-463, 2000. P. 467-470.

8. Веселовский И.С., Жуков А.Н., Панасенко О.А. Переполосовка гелиосферного магнитного поля: теоретическая модель // *Астрон. Вестник*. 2002. Т.36, N.1. С. 88.

*НИИЯФ МГУ*