

УДК 523.942-337

## ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ОТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ КОРОНЫ В ХОДЕ 23 ЦИКЛА

© 2013 г. Н. А. Лотова\*, В. Н. Обридко

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН им. Н. В. Пушкова, Москва*

Поступила в редакцию 10.12.2012 г.

Изучена зависимость положения звуковой точки солнечного ветра от магнитного поля в солнечной короне в течение 23 цикла. Показано, что эта зависимость является довольно сильной на восходящей фазе и в максимуме цикла. С ростом магнитного поля в короне расстояние до звуковой точки падает. Поскольку ранее было показано, что расстояние до звуковой точки находится в антикорреляции со скоростью солнечного ветра, полученный результат указывает на сильную положительную связь магнитного поля короны и скорости солнечного ветра. Ситуация резко меняется через 2 года после календарной даты максимума цикла. Начиная с 2004 г., скорость солнечного ветра перестает зависеть от магнитного поля, вплоть до минимума цикла в декабре 2008 г. В 2009 г. сильная зависимость скорости от магнитного поля короны восстанавливается. Высказаны соображения о связи этого эффекта с двумя различными механизмами нагрева короны, относительная эффективность которых, в свою очередь, определяется соотношением магнитных полей разных масштабов.

*Ключевые слова:* солнечное магнитное поле, солнечный ветер, метод просвечивания радиоисточниками.

DOI: 10.7868/S0320010813070127

### НОВЫЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

В последние годы в изучении солнечного ветра возникли новые возможности, которые позволяют изучать циклы солнечной активности по солнечному ветру, поскольку солнечный ветер является продолжением магнитных полей солнечной короны в межпланетное пространство. В экспериментальном изучении солнечного ветра была разработана новая, современная модификация метода просвечивания, которая основана на совместном использовании двух ранее известных модификаций метода в изучении одной и той же области межпланетной среды (Лотова и др., 2010, 2011). В прежних исследованиях (Коджима и др., 1998; Швенн, 2006) такой подход не использовался.

Процесс ускорения солнечного ветра не является одномоментным. Вблизи Солнца на расстоянии  $R \sim (10-30)R_{\odot}$  происходит ускорение потока солнечного ветра на волнах звукового диапазона. В результате солнечный ветер становится сверхзвуковым. Затем по мере удаления в межпланетное пространство в области радиальных расстояний  $R \sim (30-60)R_{\odot}$  происходит повторное ускорение

уже сверхзвукового потока на магнито-звуковых волнах и далее в области расстояний  $R > 60R_{\odot}$  возникает дополнительное ускорение солнечного ветра на волнах альвеновского диапазона. Поскольку основной целью работы является изучение взаимосвязи сверхзвукового потока с магнитными полями солнечной короны, мы остановились на наиболее близкой к Солнцу области ускорения, транззвуковой области солнечного ветра.

В новой модификации метод просвечивания используется на радиальных расстояниях от Солнца  $R \approx (2.5-70)R_{\odot}$ , включающих область формирования сверхзвукового солнечного ветра. Изучаются одновременно два режима — сильного и слабого рассеяния радиоволн (Лотова и др., 2010, 2011). В первом случае наблюдения проводятся на радиотелескопе ДКР-1000 РАО РАН, г. Пущино, длина волны  $\lambda \sim 3$  м, где в качестве просвечивающих источников используются квазары. При этом в режиме сильного рассеяния радиоволн изучается радиальная зависимость угла рассеяния  $2\Theta(R)$ . Во втором случае используется радиотелескоп РТ-22, длина волны  $\lambda = 1.35$  см, а в качестве просвечивающих — мазерные источники линии водяного пара. В этом случае в режиме слабого рассеяния изучается радиальная зависимость индекса

\* Электронный адрес: lotova@izmiran.ru

мерцаний  $m(R)$ . Независимое использование двух модификаций метода просвечивания одновременно или в близкие сроки позволило значительно расширить статистику просвечивающих источников, сближающихся с Солнцем на малых угловых расстояниях, и на этой основе перейти к масштабным радиоастрономическим экспериментам по зондированию околосолнечной межпланетной плазмы. Данные экспериментов позволяют локализовать в межпланетном пространстве положение границ переходной, трансзвуковой области солнечного ветра: внутренней  $R_{in}$  и внешней границы  $R_{out}$ . Внутренняя граница имеет особое значение, поскольку именно в этой точке скорость солнечного ветра начинает превышать локальную скорость звука. Поэтому эту точку на одномерных диаграммах часто называют звуковой точкой. По этим данным можно построить радиокарты гелиоширотной структуры солнечного ветра.

В другом новом методе изучаются процессы перестройки радиальных магнитных полей в верхней солнечной короне на поверхности источника  $R \sim 2.5R_{\odot}$ , формирующие неоднородную, струйную структуру течения солнечного ветра. Этот метод основан на изучении корреляционной зависимости положения звуковой точки солнечного ветра  $R_{in}(\varphi)$ , где  $\varphi$  — гелиоширота, от напряженности магнитного поля в солнечной короне, в точке, сопряженной с положением звуковой точки  $R_{in}$ :

$$R_{in} = F(|B_R|), \quad R = 2.5R_{\odot}. \quad (1)$$

Корреляционная диаграмма этой зависимости распадается на дискретные ветви — типы потоков солнечного ветра, которые различаются на различных годовых этапах солнечного цикла (Лотова и др., 2010, 2011). В дополнение к данным, приведенным в работах Коджимы (1998), Швенна (2006), нами были проведены теоретические расчеты магнитных полей в солнечной короне (Обридко, Ермаков, 1989; Обридко, Шельтинг, 1992), которые позволили выделить в 23 солнечном цикле потоки одиннадцати типов.

Конечно, если скорость солнечного ветра считать чисто радиальной, то зависимость ее от радиальной составляющей магнитного поля короны кажется странной, поскольку при параллельности скорости и магнитного поля магнитное поле не действует на плазму.

Дело в том, что ускорение солнечного ветра начинается на значительно меньших высотах. Солнечный ветер выдувается как из сопла или дымовой трубы. И хотя непосредственно на поверхности источника поле радиально, его величина определяется всей структурой поля в сферическом слое от фотосферы до поверхности источника. Таким образом и возникает корреляция между величиной поля на поверхности источника и радиальным течением плазмы.

### ЭВОЛЮЦИЯ КОМПОНЕНТЫ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ОТ СТРИМЕРОВ В ХОДЕ 23 СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА

Для одного из типов потоков, связанного со стримерами, обнаруживается интересная особенность.

Зависимость  $R_{in}$  от  $|B|$  для стримеров может быть выражена следующей зависимостью:

$$R_{in} = R_0 \times |B_R|^{-\alpha}, \quad (2)$$

которая в в log—log системе координат представляет собой прямую линию.

Смысл входящих в выражение (2) характеристик следующий. Величина  $R_0$  соответствует условному положению границы переходной области в случае  $|B| \approx 1\mu T$ . Параметр  $\alpha$  указывает на степень связи между полем и скоростью потока, поскольку  $R_{in} \sim v^{-1}$ . Вообще говоря, расстояние до “звуковой точки” зависит не только от скорости солнечного ветра, но и от его температуры и магнитного поля. В данном случае мы просто опирались на экспериментальные работы. Существование обратной взаимосвязи между положением внутренней границы трансзвуковой области и скоростью солнечного ветра  $R_{in} \sim v^{-1}$  было установлено в работах Лотовой и др. (1992, 2002). В первом случае эта взаимосвязь была найдена по данным радиоастрономических экспериментов, во втором случае привлекались данные о скорости солнечного ветра, полученные с использованием космических аппаратов. Вероятно, прочие связи неявно входят в общую зависимость расстояния до звуковой точки от скорости.

В дальнейшем изучении процесса формирования сверхзвукового потока солнечного ветра следует учитывать, что рис. 1, 2 получены на основе экспериментально изученных радиальных зависимостей характеристик рассеяния радиоволн: угла рассеяния  $2\Theta(R)$  и индекса мерцаний  $m(R)$ . Совпадающие в этих характеристиках структурные особенности радиального профиля  $2\Theta(R)$  и  $m(R)$  позволяют определить положение критической точки солнечного ветра  $R_{in}$  на шкале радиальных расстояний от Солнца. Полученный таким образом комплект данных о пространственном положении звуковой точки солнечного ветра  $R_{in}$  был использован в рис. 1, 2. Другой использованный на рис. 1, 2 параметр  $B_R$  — напряженность магнитного поля в солнечной короне в точке  $R$ , сопряженной с положением критической точки  $R_{in}$ , вычислялся на основе метода, разработанного ранее в работах Обридко и др. (2012), Обридко, Ермаков (1989), Обридко, Шельтинг (1992).

С ростом  $\alpha$  при фиксированном значении поля величина  $R_{in}$  уменьшается, что и означает увеличение скорости потока.

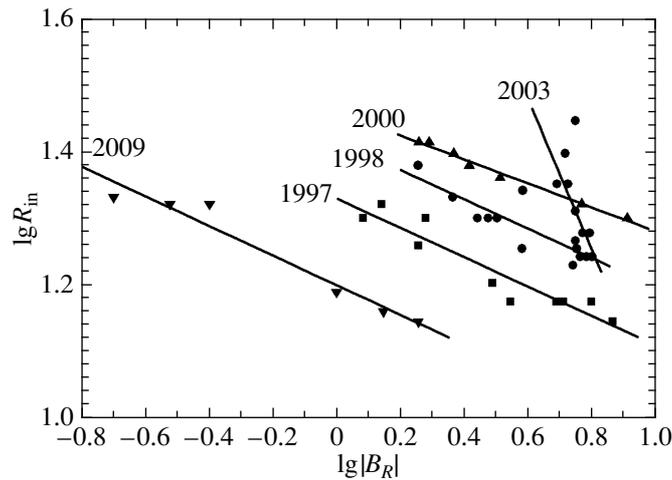


Рис. 1. Зависимость  $\lg R_{in}$  от величины магнитного поля  $\lg |B_R|$  на восходящей ветви 23 цикла.

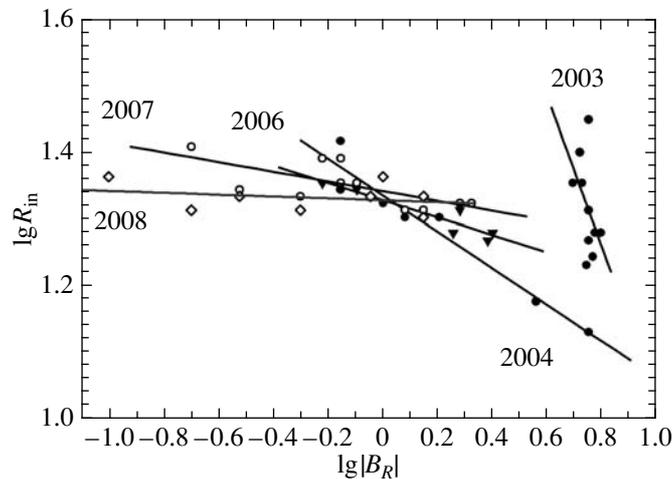


Рис. 2. Зависимость  $\lg R_{in}$  от величины магнитного поля  $\lg |B_R|$  на нисходящей ветви 23 цикла.

Эта связь обнаруживает интересную вариацию со временем. На возрастающей ветви цикла (рис. 1) устанавливается довольно строгая линейная зависимость:

$$\lg R_{in} = \lg R_0 - \alpha \lg |B_R|. \quad (3)$$

При этом показатель степенной зависимости  $\alpha$  меняется мало, слабо уменьшаясь к максимуму цикла, но год от года увеличиваются диапазоны значений  $\lg R_0$  и  $\lg |B_R|$ . При этом внутри каждого года сохраняется убывающая зависимость  $\lg R_{in}$  от  $\lg |B_R|$ , т.е. в малых временных масштабах скорость солнечного ветра растет с ростом  $|B_R|$ .

Это означает, что в течение всего этого времени на восходящей ветви 23 цикла механизм ускорения солнечного ветра мало меняет свои параметры. Однако при этом уменьшаются эффективные характерные размеры ускоряющей области за счет

усиления локальных полей. Это приводит к увеличению эффективного значения  $R_0$ , т.е. свидетельствует опять-таки об увеличении скорости потока.

Так продолжается до 2003 г., в котором значения  $|B_R|$  заключены в столь узком диапазоне, что линейная аппроксимация (3) становится бессмысленной. После 2003 г. ситуация резко изменяется (рис. 2). Теперь при относительно мало изменяющихся средних значениях  $R_{in}$  и  $|B_R|$  меняется наклон  $\alpha$ , приближаясь в минимуме цикла практически к нулевому значению.

Это, по-видимому, означает, что в 2003 г. изменяется основной механизм ускорения солнечного ветра. Величина  $\alpha$  после достижения значительного максимума в 2003–2004 гг. быстро падает и расстояние  $R_{in}$  практически перестает зависеть от магнитного поля. Это означает переход к клас-

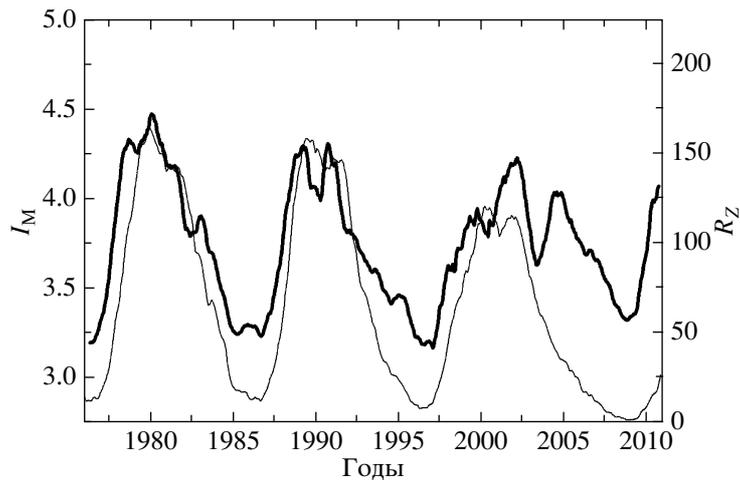


Рис. 3. Зависимость индекса эффективного мультиполя  $I_M$  (жирная линия) и числа солнечных пятен  $R_Z$  (тонкая линия) от времени.

сическому немагнитному расширению солнечной короны.

### ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Наблюдаемые в экспериментах изменения характеристик в зависимости (2), по-видимому, связаны с различным влиянием магнитных полей разного масштаба на скорость солнечного ветра. При этом следует иметь в виду, что соотношение этих полей меняется с фазой цикла. На рис. 3 тонкой линией показаны традиционные числа солнечных пятен ( $R_Z$ ). Жирной линией показан используемый Обридко и др. (2012) индекс эффективного мультиполя  $I_M$ .

$$I_M = -0.5 \lg(I_s/I_\odot) / \lg(2.5), \quad (3)$$

где  $I_s$  и  $I_\odot$  — это средние значения квадрата радиальной компоненты магнитного поля на уровнях поверхности источника ( $r = 2.5R_\odot$ ) и фотосферы ( $r = R_\odot$ ) соответственно.

Индекс  $I_M$  определяет собой соотношение крупномасштабных и мелкомасштабных полей. Когда на Солнце преобладают глобальные поля с характерными пространственными масштабами, сравнимыми с радиусом Солнца, индекс  $I_M$  приближается к дипольному значению 3, а когда преобладают поля более мелкого масштаба, в максимумах циклов он приближается к пяти.

Из рис. 3 видно, что после максимума цикла 23 в 2000–2001 гг. индекс  $I_M$  резко понизился и к 2003 г. достиг почти дипольного значения. Вообще говоря, такое падение наблюдалось и в 22 цикле, но там оно было гораздо меньше и ближе к максимуму цикла.

Для дальнейшего важно, что индекс  $I_M$  отражает именно энергетический вклад полей разного масштаба, он нечувствителен к структурным изменениям полей. Поэтому он принимает квазидипольное значение как в минимуме, когда преобладает осевой диполь, так и на фазе спада, когда часто преобладает экваториальный диполь (Лившиц, Обридко, 2006). Именно экваториальный диполь, ответственный за низкоширотные корональные дыры и гелиосферный токовый слой, определяет собой медленный солнечный ветер на фазе спада солнечного цикла. В данном случае под гелиосферным токовым слоем мы понимаем магнитный экватор, разделяющий противоположно направленные открытые магнитные поля на Солнце. Этот экватор искривлен, и его вид часто сравнивают с юбкой балерины.

Мы никак не рассматриваем здесь взаимодействие солнечного ветра с межпланетной средой.

На рис. 4 кружками, соединенными тонкой линией, показана скорость солнечного ветра вблизи Земли, усредненная по 27-дневным периодам по данным OMNI-2 ([ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/spacecraft\\_data/omni/](ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/spacecraft_data/omni/)). Черной жирной линией показан магнитный момент экваториального диполя  $M_{eq}$  по данным Обсерватории Джона Вилкокка (<http://wso.stanford.edu/gifs/Dipall.gif>). Видно, что всплеск скорости в 2003 г. совпадает с усилением величины экваториального диполя.

Заметим, однако, что циклические вариации экваториального диполя состоят не только в изменении его величины, но и в повороте всей структуры крупномасштабного магнитного поля и увеличении изгиба (tilt) гелиосферного токового слоя.

В течение цикла происходит постепенное изменение раствора токового слоя. Полусумма пре-

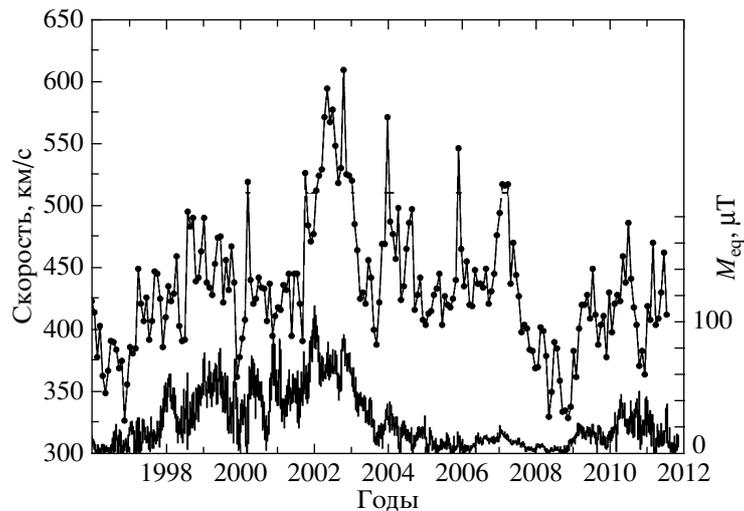


Рис. 4. Зависимость скорости солнечного ветра (кружки и тонкая линия) и магнитного момента экваториального диполя (жирная линия) от времени.

дельных отклонений нейтральной линии от экватора называется тилт (tilt) и характеризует собой постепенное изменение масштаба поля на поверхности источника. Именно это изменение и приводит к расширению оснований стримеров и увеличению широтной зоны, которую они занимают.

На рис. 5 черными кружками, соединенными толстой линией, показано изменение величины  $\lg R_0$ , а черными тонкими линиями — изменение величины тилта  $\Delta$  (<http://wso.stanford.edu/gifs/Tilts.gif>). Принято считать, что при достижении величины тилта  $\Delta$  значения  $70^\circ$  наступает начало фазы переполюсовки полярного поля. Эта фаза длится один-полтора года и примерно соответствует по времени фазе максимума солнечной активности.

На рис. 6 кружками и тонкой линией показано изменение  $\alpha$  — показателя экспоненциальной зависимости  $R_{in}(|B_R|)$ , жирной линией — изменение величины экваториального диполя  $M_{eq}$  (<http://wso.stanford.edu/gifs/DipallR.gif>). Значения  $\alpha$  для 2003 г. исключены как ненадежные (см. рис. 1, 2).

Видно, что есть определенное сходство в поведении кривых  $\lg R_0$  и  $\Delta$ .

Заметим, что резкий подъем величины экваториального диполя привел к сильному увеличению величины  $\alpha$ . В дальнейшем обе величины синхронно падают, одновременно достигая минимума. Показательно, что в 2009 г. значение  $\alpha$  практически совпадает с величиной  $\alpha$  в 1997 г., а в 2010 г. близко к значению  $\alpha$  в максимуме 23 цикла в 2000 г. Дело в том, что фаза роста 24 цикла была очень короткой и уже в 2010 г. экваториальный диполь достиг своего максимума. Это указывает на определенное сходство связи величин  $\alpha$  и  $M_{eq}$  в двух соседних

циклах, несмотря на различие в мощности этих циклов.

Таким образом, циклическая вариация зависимости  $R_{in}(|B_R|)$  представляется результатом сложного взаимодействия полей разных масштабов. На фазе роста солнечной активности вклад локальных полей приводит к увеличению раствора гелиосферного слоя и амплитуды экваториального диполя, что отражается в постепенном смещении диапазона значений  $R_{in}$  и  $|B_R|$  к более высоким значениям. Растет и величина оснований стримеров. При этом внутри каждого года сохраняется отрицательная корреляция между  $R_{in}$  и  $|B_R|$ . Таким образом, в этот период ускорение солнечного ветра имеет магнитный характер. Как показано в работах Лотовой и др. (1992, 2002), чем меньше  $R_{in}$ , тем больше соответствующая скорость солнечного ветра. Таким образом, отрицательная корреляция между  $R_{in}$  и  $|B_R|$  указывает на наблюдавшуюся в это время положительную связь между скоростью солнечного ветра и магнитным полем короны. Ранее положительную связь между магнитным полем и яркостью зеленой короны обнаружили Бадалян и Обридко (2006, 2007). В свою очередь, эта связь в работах Бадалян и Обридко интерпретировалась как следствие неволнового механизма нагрева короны. Эта связь особенно значима через 2 года после максимума цикла, когда достигает своего максимума экваториальный диполь. В этот момент локальные поля еще сохранили свое высокое значение, но к ним присоединились сильные крупномасштабные поля.

После 2003 г. локальные поля падают, растет вклад крупномасштабных полей с одновременным поворотом диполя в осевое положение. Начинают синхронно убывать как характеристики солнечной

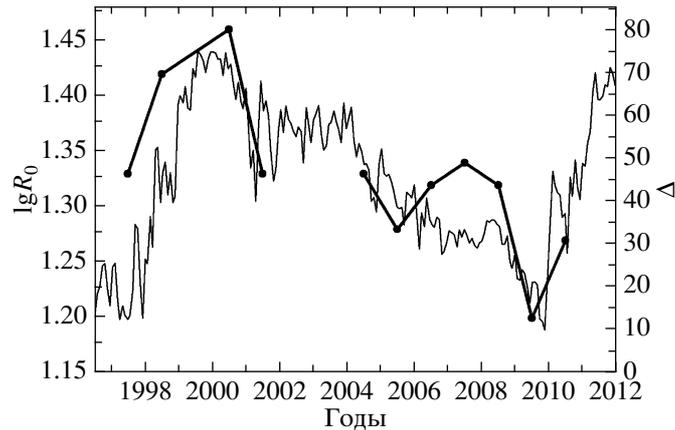


Рис. 5. Зависимость  $\lg R_0$  (кружки и толстая линия) и раствора гелиосферного токового слоя  $\Delta$  (тонкая линия) от времени.

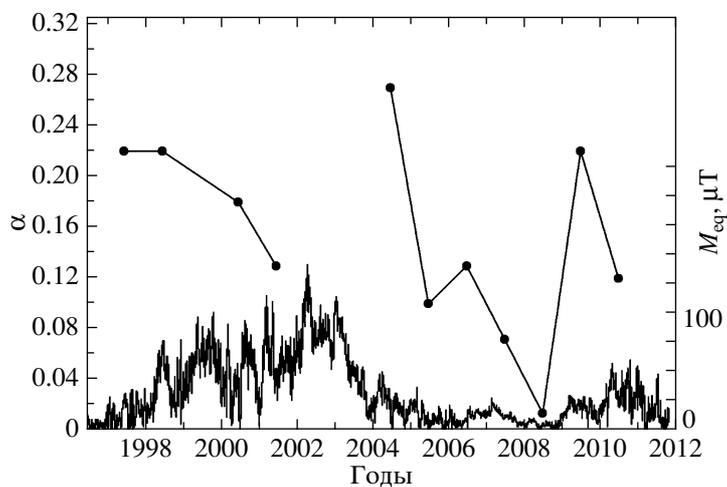


Рис. 6. Зависимость показателя экспоненциальной зависимости  $\alpha$  (кружки и тонкая линия) и магнитного момента экваториального диполя  $M_{eq}$  (жирная линия) от времени.

активности и глобального поля ( $R_Z$  и  $M_{eq}$ ), так и основная характеристика связи расстояния до звуковой точки с магнитным полем  $\alpha$ . Уменьшение связи скорости и поля, вероятно, связано с тем, что на этой стадии возрастает роль волновых источников нагрева короны, для которых характерна слабая (или даже отрицательная) связь поля и яркости короны (Бадалян, Обридко, 2006, 2007).

В общем случае положение звуковой точки определяется не только темпом нагрева, но и конфигурацией линий тока (иными словами, неоднородностью течения). Однако мы не могли учесть такие тонкие эффекты, и в пределах достаточно широкого потока структура предполагалась однородной.

Разумеется, настоящая работа не претендует на попытку разобраться в механизмах нагрева короны. Механизмам нагрева короны посвящены мно-

гие другие работы, в том числе и авторов. Мы обращаем внимание на новую интересную особенность связи магнитного поля в короне Солнца и скорости солнечного ветра. Эта особенность совпадает с резкой перестройкой структуры магнитного поля на Солнце.

Как известно, все механизмы нагрева короны распадаются на два класса. Часть моделей (DC) основана на медленной диссипации магнитного поля, другая часть (волновые модели — AC) опирается на диссипацию альвеновских волн разных типов. Обзор моделей см. в работах Ашвандена (2004), Мандрини и др. (2000). Оказалось, что в нагреве короны участвуют оба механизма, но их относительная роль зависит от соотношения полей разных масштабов (Бадалян, Обридко, 2006, 2007).

Таким образом, анализ связи между скоростью солнечного ветра и магнитным полем в солнечной короне подтверждает гипотезу о двойственном

характере механизмов нагрева короны. На восходящей ветви и в максимуме цикла более эффективны механизмы нагрева короны, связанные с магнитным полем (ДС), вероятно, определяемые микровспышками и пересоединением.

На фазе спада солнечного цикла зависимость скорости солнечного ветра от магнитного поля падает. На этой стадии более эффективен волновой нагрев (АС).

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 11-02-00259а).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ашванден (M.J. Aschwanden), *Physics of the Solar Corona: An Introduction* (Berlin: Springer, 2004).
2. Бадалян, Обридко (O.G. Badalyan and V.N. Obridko), *Solar Phys.* **238**, 271 (2006).
3. Бадалян, Обридко, Письма в Астрон. журн. **33**, 210 (2007) [O.G. Badalyan and V.N. Obridko, *Astron. Lett.* **33**, 182 (2007)].
4. Коджима и др. (M. Kodjima, K. Asai, K. Hakamada, T. Ohmi, et al.), *ATP Conf. Prog.* **471**, 29 (1998).
5. Лившиц И.М., Обридко В.Н., *Астрон. журн.* **83**, 1031 (2006) [I.M. Livshits, V.N. Obridko, *Astron. Rep.* **50**, 926 (2006)].
6. Лотова Н.А., Корелов О.А., Писаренко Е.В., *Геомагнетизм и аэрономия* **32**, 78 (1992).
7. Лотова и др. (N.A. Lotova, K.V. Vladimirkii, V.N. Obridko, et al.), *Solar Phys.* **205**, 149 (2002).
8. Лотова и др. (N.A. Lotova, K.V. Vladimirkii, and V.N. Obridko), *Geomagn. Aeron.* **50**, 711 (2010).
9. Лотова и др. (N.A. Lotova, K.V. Vladimirkii, and V.N. Obridko), *Solar Phys.* **269**, 129 (2011).
10. Мандрини и др. (C.H. Mandrini, P. Demoulin, and A.J.A. Klimchuk), *Astrophys. J.* **530**, 999 (2000).
11. Обридко, Ермаков (V.N. Obridko and F.A. Yermakov), *Astron. Tsirk.* **1539**, 24 (1989).
12. Обридко, Шельтинг (V.N. Obridko and B.D. Schelt-ing), *Solar Phys.* **173**, 167 (1992).
13. Обридко и др. (V.N. Obridko, E.V. Ivanov, A. Ozguc, et al.), *Solar Phys.* **281**, 779 (2012).
14. Швенн (R. Schwenn), *Space Sci. Rev.* **124**, 51 (2006).

---

Сдано в набор 11.03.2013 г.	Подписано к печати 29.04.2013 г.	Дата выхода в свет 20 еж.	Формат 60 × 88 <sup>1</sup> / <sub>8</sub>
Цифровая печать	Усл. печ. л. 10.25	Усл. кр.-отт. 0.9 тыс.	Уч.-изд. л. 10.25
	Тираж 87 экз.	Зак. 1401	Бум. л. 5.12
			Цена свободная

---

Учредители: Российская академия наук, Институт космических исследований РАН

---

Издатель: Российская академия наук. Издательство "Наука", 117997 Москва, Профсоюзная ул., 90

Оригинал-макет подготовлен МАИК "Наука/Интерпериодика"

Отпечатано в ППП «Типография "Наука"», 121099 Москва, Шубинский пер., 6