

УДК 523 047-355

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ: СРАВНЕНИЕ С КЛАССИЧЕСКОЙ МОДЕЛЬЮ

© 2007 г. А. Б. Аскеров¹, В. Н. Обридко²

¹Шамахинская астрофизическая обсерватория им. Н. Туси НАН Азербайджана,
Шамахи (Республика Азербайджан)

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова
РАН, Троицк (Московская обл.)
e-mail: asgarov@gmail.com
e-mail: obridko@izmiran.ru

Поступила в редакцию 20.03.2006 г.
После доработки 01.11.2006 г.

Изучено распределение магнитного поля солнечного ветра вблизи Земли и сопоставлено с тем, что ожидалось по классической модели. Показано, что двухвершинность распределения значений межпланетного магнитного поля, обнаруженная ранее, не является артефактом усреднения, а отражает реальную структуру магнитного поля внутри сектора. При этом более часто встречается магнитное поле полярности, соответствующее ведущему пятну северного полушария. С увеличением активности растет не только модуль магнитного поля, но и по отдельности поля каждой полярности. Расстояние между пиками на гистограмме магнитного поля вблизи Земли увеличивается с 6 нТл до 10 нТл. В поперечном усилении пиков наблюдается квази-22-летний цикл, в напряженности поля каждой полярности – 11-летний, а в отношении пиков к частоте встречаемости нулевых значений – квазидвухлетний (2.6 ± 0.3 года). Приблизительно в 25% случаев классическая модель нарушается.

PACS: 96.50.Bh

1. ВВЕДЕНИЕ

Широко распространенная в настоящее время концепция спокойного солнечного ветра использует в своих расчетах довольно простую схему поверхности источника [Biermann, 1957; Parker, 1958]. Согласно этой схеме вся гелиосфера делится на две области, зону свободного поля и зону солнечного ветра. В первой зоне магнитное поле существует как бы в вакууме и полностью определяется наблюдаемой структурой поля на поверхности фотосферы. Единственное дополнительное условие состоит в том, что где-то на условной поверхности источника потенциал строго равен нулю, силовые линии строго радиальны. Далее в межпланетной среде имеет место радиальное расширение, поле полностью увлекается солнечным ветром. Строго говоря, после этого нет никаких принципиальных трудностей в расчете поля у Земли. Основные трудности переносятся в правильное измерение магнитного поля на уровне фотосферы, внесение соответствующих коррекций и оптимальный выбор поверхности источника. В основном варианте (который мы придерживаясь терминологии [Hoeksema and Scherrer, 1986] будем в дальнейшем называть классическим) предполагается, что поверхность источника представляет собой сферу с радиусом 2.5 радиуса Солнца. В среднем для спокойного вытекающего

потока радиальное солнечное магнитное поле в межпланетном пространстве должно уменьшаться как r^{-2} .

Результаты в целом оказались весьма обнадеживающими, знак B_{XE} – радиальной составляющей межпланетного магнитного поля (ММП) вблизи Земли оказался в целом хорошо согласующимся со знаком B_{SS} – радиальной составляющей магнитного поля на поверхности источника (с учетом транспортного времени 4 дня). Общая расчетная структура магнитного поля довольно хорошо согласуется с наблюдаемой [Обридко и др., 1994]. Это, по-видимому, связано с тем, что структура в целом определяется крупномасштабным полем на Солнце. Отсюда следует другой важный для нашей задачи вывод, что первые гармоники, определяющие крупномасштабное поле, вычисляются достаточно точно. Как следствие этого, можно полагать, что магнитное поле на поверхности источника, определяемое несколькими первыми гармониками, вычисляется вполне достоверно. Это означает, что общая структура магнитного поля в короне Солнца и в околосолнечном межпланетном пространстве должна вычисляться достаточно хорошо. Это подтверждено результатами сравнения со структурой и поляризацией короны [Бадалян и др., 1999; Badalyan et al., 2002; Sykora et al., 2002] и корреляционными

сравнениями с ММП [Hoeksema and Scherrer, 1986; Obridko and Shelting, 1999a,b]. Многочисленные сопоставления расчетов магнитного поля с циклическими вариациями крупномасштабной активности, с корональными выбросами массы [Ivanov et al., 1999; Ivanov and Obridko, 2001], со структурой и поляризацией короны, положением корональных дыр в областях открытого магнитного поля [Obridko and Shelting, 1999a], знаками магнитного поля в секторной структуре [Obridko and Shelting, 1999b], геомагнитными возмущениями [Obridko and Shelting, 1992] показывают, что в целом система расчетов, опирающаяся на потенциальное приближение и концепцию постоянной сферически-симметричной поверхности источника, пригодны для расчетов структуры поля.

Однако величина B_{XE} , рассчитанная на основе стандартного закона расширения r^{-2} , оказалась гораздо меньше, чем непосредственно измеренная [Obridko et al., 1996]. В работе [Обридко и др., 2004] сделана попытка объяснить это расхождение введением закона расширения с показателем, несколько меньшим, чем 2. Попытки исправить ситуацию с помощью изменений схемы расчетов (концепция радиальности поля в фотосфере, перенос поверхности источника на другую высоту, введение двух поверхностей источника), принципиально не улучшили эту ситуацию. Природу отличия среднего масштаба расчетного и измеренного поля в гелиосфере нужно искать в другом, поэтому пришлось вновь обратиться к достоверности измеренных в фотосфере магнитных полей. При этом в качестве тестов величины можно использовать как ММП, так и вариации галактических космических лучей.

В работе [Обридко и др., 2006] с единой точки зрения проанализированы все общепринятые в настоящее время схемы расчетов и используемые базы исходных данных. Показано, что все эти предположения и ограничения не могут исказить общую структуру и зависимость от цикла как солнечных, так и межпланетных данных. В то же время измеренные на Солнце значения занижены как следствие насыщения сигнала магнитографов. Показано, что поправка должна зависеть как от гелиоцентрической широты наблюдения, так и от фазы солнечного цикла. Предложена методика поправки, которая обеспечивает хорошее согласие рассчитанных и измеренных значений. Созданная база данных позволяет производить количественный расчет магнитных полей в солнечном ветре вблизи Земли.

В дальнейшем, в работе [Белов и др., 2006], на основе данных работы [Обридко и др., 2006] для длительного периода (1976–2004 гг.) за каждый день было рассчитано солнечное магнитное поле B_S в геометрической точке проекции Земли на поверхность источника солнечного ветра. Эти дан-

ные сопоставлялись со среднесуточными значениями скорости солнечного ветра и различными компонентами ММП у Земли. Статистический анализ выявил достаточно тесную связь между характеристиками солнечного ветра у Солнца и у Земли в периоды без значительных спорадических солнечных и межпланетных возмущений. Предложены численные эмпирические модели, позволяющие по наблюдениям солнечного магнитного поля вычислять скорость солнечного ветра, напряженность ММП, его продольную и BZ -составляющие. Во всех этих моделях главную роль играет величина B_S . Показано, что в спокойные и относительно слабозвозмущенные периоды на основе наблюдений солнечного магнитного поля можно прогнозировать изменения A_p -индекса геомагнитной активности на 3–5 дней вперед, причем качество такого прогноза выше, чем у существующих прогнозов, составляемых традиционными методами.

При этом пересчет вычисленных на поверхности источника значений магнитного поля B_S к значениям в окрестности Земли (B_{XE}) осуществлялся, как и ранее, с помощью закономерности радиального расширения r^{-2} . Согласно этому закону распределение величин магнитного поля вблизи Земли с точностью до постоянного масштабного множителя должно совпадать с распределением на поверхности источника.

Ситуация однако несколько сложнее. С одной стороны в 84% всех дней знак B_S правильно определяет полярность ММП, а при достаточно больших величинах $|B_S|$ соответствие полярностей почти полное. Вместе с тем связь B_S и B_{XE} явно не линейна, а при малых величинах $|B_S|$ полярности часто смешиваются. Бросается в глаза, что близкие к нулю напряженности магнитного поля значительно чаще встречаются на поверхности источника, чем у Земли. Если сравнить распределения B_S и B_{XE} по величине (см. рис. 4 в [Белов и др., 2006]) этот факт становится еще очевиднее. Распределение поля на поверхности источника одновершинное с центром тяжести в нуле, распределение же поля вблизи Земли явно двухвершинное с максимумами вблизи ± 2.5 нТл. Из сравнения этих распределений следует, что слабые солнечные поля, как правило, не доходят до Земли. Возможно, частично это различие может быть объяснено меньшей точностью определения магнитного поля на поверхности источника в сравнении с точностью межпланетных измерений, но мы полагаем, что за этим различием стоят и более серьезные физические причины. Как уже не раз отмечалось [Обридко и др., 2004], сферическая поверхность источника со строго радиальным магнитным полем во всех точках – это не более чем абстракция. Реальное магнитное поле не может быть строго радиальным по всей сфере. Оно расширяется ниже поверхности источника и (в некоторых обла-

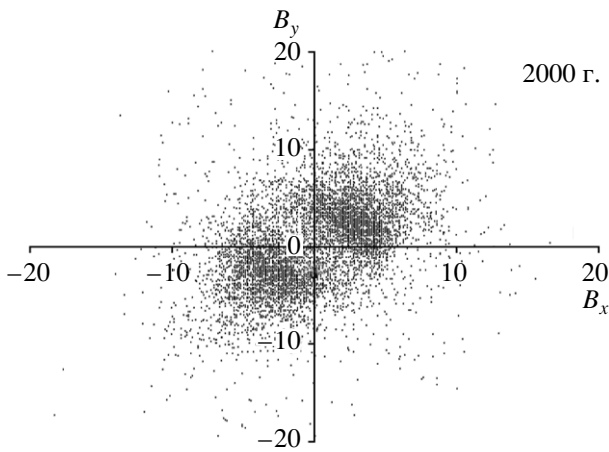


Рис. 1 Диаграмма соотношения измеренных среднечасовых значений B_x – B_y для 2000 года.

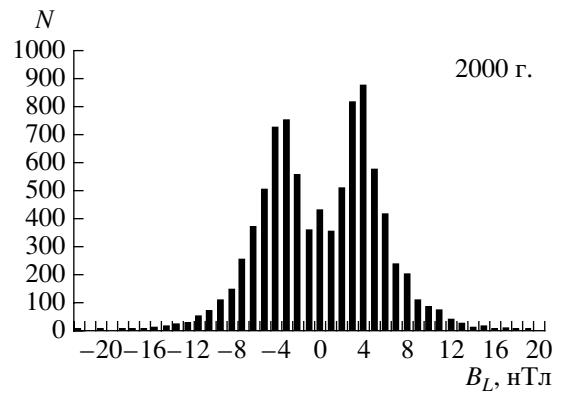


Рис. 2. Гистограмма распределения значений B_L за 2000 год.

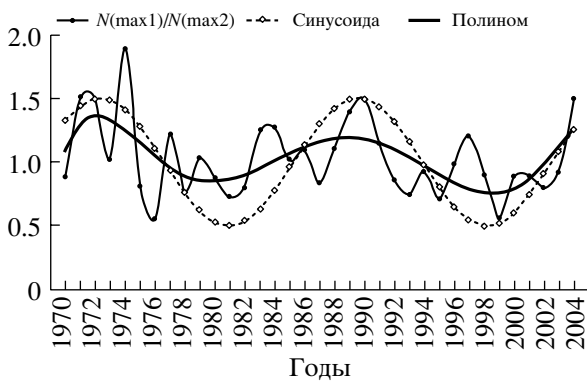


Рис. 3 График изменения отношений высот пиков гистограммы

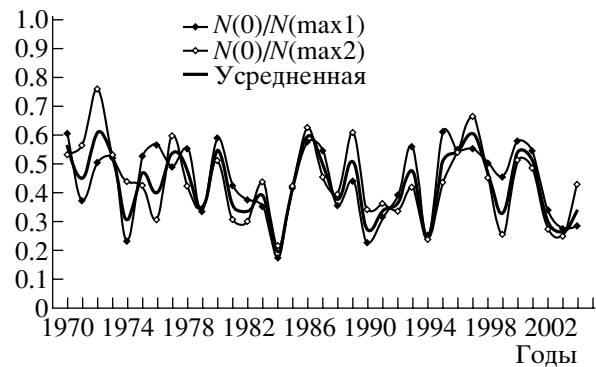


Рис. 4 Изменение отношения высоты гистограммы, соответствующей нулевому значению B_L , к высоте пиков гистограммы.

стях, например, над корональными дырами) не остается радиальным и выше этой поверхности. В этом процессе слабые поля могут замещаться более сильными, не всегда сохраняя первоначальную полярность.

Настоящая работа посвящена более подробно изучению этого эффекта. В частности, было интересно проверить не является ли этот эффект просто артефактом усреднения и не исчезает ли он при использовании, скажем, среднечасовых значений. Если же этот эффект существует реально, было интересно проверить как характеристики этого эффекта зависят от времени и фазы солнечного цикла.

2. ДИАГРАММА СООТНОШЕНИЯ ИЗМЕРЕННЫХ СРЕДНЕЧАСОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ

В работе используются среднечасовые значения скорости солнечного ветра и характеристики ММП из базы данных OMNI (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/omniweb>) за 35 лет (1970–2004 гг.).

Поскольку в настоящей работе мы не использовали непосредственно солнечные данные, многие из ограничений, указанных в работах [Обридко и др., 2004, 2006; Белов и др., 2006] снимаются.

На рис. 1 показана диаграмма соотношения измеренных среднечасовых значений B_x – B_y для 2000 года. Заметно скопление точек в 1-й и 3-й четверти, что и соответствует традиционной модели с учетом того, что средняя скорость солнечного ветра близка к угловой скорости вращения спирали. Тем не менее довольно много точек находится во 2-й и 4-й четвертях, что вообще говоря, невозможно в рамках модели Паркера при любой скорости распространения. В принципе это возможно только, если допустить, что в основании солнечного ветра существует трансверсальная компонента, которая, к тому же, может поворачиваться в процессе распространения. Очевидно, что эти предположения противоречат классической модели спокойного солнечного ветра, но они могут реализоваться в нестационарных явлениях ти-

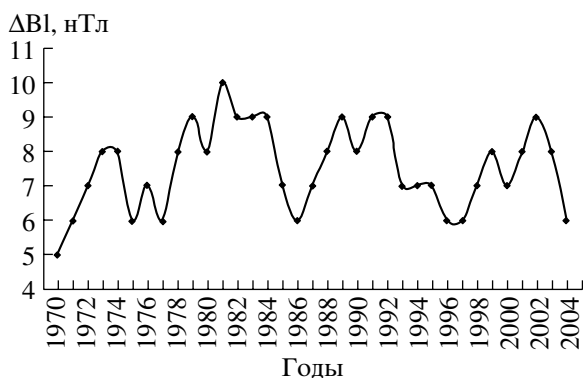


Рис. 5. Изменение расстояния между пиками (ΔB_L) со временем.

па корональных выбросов массы. Аналогичные отклонения от простой спиральной модели отмечены [Веселовским и Тарсиной, 2001]. Статистические свойства параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля изучались также в [Веселовский и др. 2000, 2000б].

Еще одна странность рис. 1 состоит в том, что практически отсутствуют точки, где обе компоненты поля равны нулю, хотя по классической концепции обращение в нуль поля B_S должно автоматически обращать в нуль обе компоненты ММП.

При отсутствии межпланетного взаимодействия в рамках классической модели радиальная составляющая поля B_S у Земли должно трансформироваться в поле, направленное вдоль спиральной силовой линии под углом $\psi = \arctg(\Omega R_E / V_{SW})$ к радиусу, где Ω — частота вращения Солнца, R_E — среднее расстояние от Земли до Солнца, V_{SW} — скорость солнечного ветра у Земли. Вычислим проекцию ММП у Земли на ожидаемую в соответствии с величиной V_{SW} силовую линию: $B_L = B_{XE} \cos(\psi) + B_{YE} \sin(\psi)$, B_{XE} и B_{YE} — компоненты поля в плоскости эклиптики) и будем называть ее продольной составляющей ММП. Знаки компоненты B_{XE} в последнем выражении выбраны так, чтобы положительным величинам B_L соответствовало направление от Солнца.

Гистограмма распределения вычисленных таким образом значений B_L за 2000 год показана на рис. 2. Видно, что использование среднечасовых значений не устранило двухвершинность гистограммы распределения B_L . Более того гистограмма стала шире и значения максимумов (пиков) на диаграмме среднечасовых значений соответствуют ± 4.5 нТл. Важно отметить, что высота этих максимумов ($\max 1$ и $\max 2$) не одинакова, и их соотношение меняется со временем.

Для рассмотрения динамики пиков B_L построена картина изменения этих пиков относительно

друг друга и относительно нулевого значения. График изменения отношения $N(\max 1)/N(\max 2)$ показан на рис. 3, здесь также показаны: черной сплошной линией — аппроксимирующий полином 6-й степени и пунктирной линией — синусоида с периодом ~ 17.25 лет. Очевидно, что в рамках ограниченной реализации период ~ 17 лет статистически неотличим от 20 лет, что в последние годы и составляет основной хейловский цикл.

Легко видеть, что максимальные отклонения от равенства пиков (то есть от единицы) соответствуют максимумам чисел Вольфа, а прохождение через единицу — фазам минимумов цикла солнечной активности. Важно отметить, что периодичность на рисунке близка к 20 годам, это значит, что в формировании двухвершинности принимает участие знак локального поля (т.е. закон Хейла). Действительно, с учетом закона Хейла можно утверждать, что в течение последних 35 лет в межпланетной среде чаще встречались поля, имеющие направление, совпадающее с направлением поля в головном пятне групп северного полушария. В годы 1971, 1990 (20 и 22 циклы) это отношение больше 1, т.е. $\max 1(\text{соотв. } -B_L) > \max 2(\text{соотв. } +B_L)$. В годы 1980, 1998 (21 и 23 циклы) это отношение меньше 1, т.е. $\max 1(\text{соотв. } -B_L) < \max 2(\text{соотв. } +B_L)$

Что же касается отношения высоты гистограммы, соответствующей нулевому значению B_L , к высотам пиков (см. Рис. 4), то мы не увидели здесь какой-либо значимой закономерности, кроме хорошо известных квазидвухлетних колебаний с периодом 2.6 ± 0.3 года.

На рис. 5 показана зависимость расстояния между пиками (ΔB_L) от времени. Здесь видна довольно четкая закономерность: пики расходятся в периоды максимумов вплоть до 9–10 нТл и сближаются в периоды минимумов вплоть до 6 нТл. Все 4 цикла в этом отношении равноценны независимо от знаков глобального и локального полей на Солнце.

3. СОПОСТАВЛЕНИЕ УГЛОВ НАПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТИ И МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Поскольку из независимых наблюдений нам известны скорость солнечного ветра V_{SW} , компоненты магнитного поля B_X и B_Y , то зная среднюю скорость вращения Солнца, мы можем вычислить направление “плазменной” ψ и магнитной γ силовых линий: $\psi = \arctg(\Omega R_E / V_{SW})$, $\gamma = \arctg(B_X / B_Y)$, при этом:

- если $B_X > 0$ и $B_Y > 0$ то $\gamma = \gamma'$ т.е., угол γ находится в интервале 0–90 градусов;
- если $B_X < 0$ и $B_Y > 0$ то $\gamma = 90 - \gamma'$ т.е., угол γ находится в интервале 90–180 градусов;

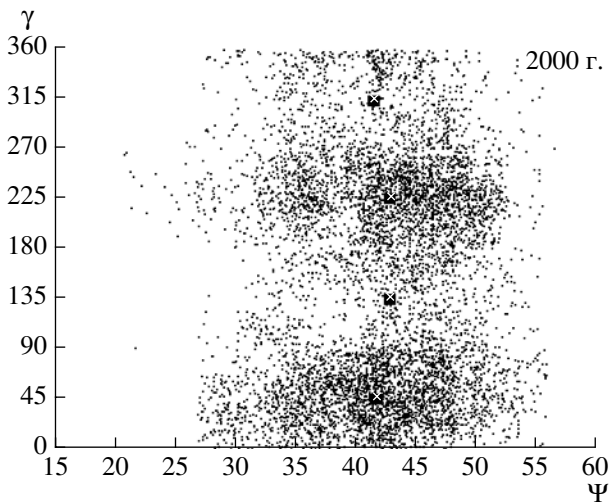


Рис. 6. Диаграмма углов $\psi - \gamma$ для 2000 года

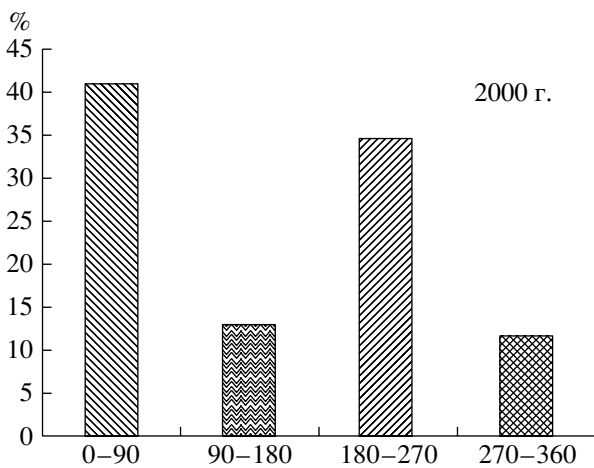


Рис. 7. Относительное число точек в 1-4 квадрантах за 2000 год.

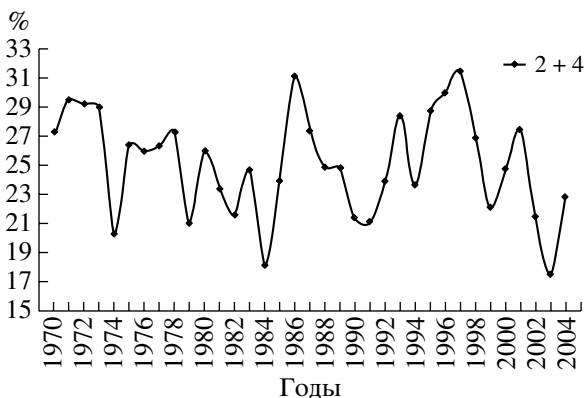


Рис. 8. Зависимость относительного числа точек во 2-ой и 4-ой квадрантах от времени (в %).

в) если $B_x < 0$ и $B_y < 0$ то $\gamma = 180 + \gamma'$ т.е., угол γ находится в интервале 180–270 градусов;

г) если $B_x > 0$ и $B_y < 0$ то $\gamma = 360 + \gamma'$ т.е., угол γ находится в интервале 270–360 градусов.

Аналогичные условия были введены для угла ψ .

В классической теории Паркера эти углы предполагаются по определению тождественными. И в самом деле, эти углы довольно близки (см. рис. 6). Однако значительное число точек попадает в 2 и 4 квадранты, что не соответствует классической теории. Черные квадраты – центры тяжести соответствующих интервалов: 0–90, 90–180, 180–270, 270–360 градусов, среднем 42 градуса.

Близость этих углов сохраняется и для их среднегодовых значений. Таким образом, наблюдаемые точки распадаются на два семейства. Большинство точек попадают в 1-ый и 3-ий квадранты и их статистика хорошо согласуется с классической теорией. Однако довольно большое число точек (около 25%) не попадает в 1-ый и 3-ий квадранты и таким образом не согласуются с классической теорией. Относительное число точек в процентах в 1–4 квадрантах за 2000 год указано на рис. 7.

Статистика распределения этих углов в % за 2000 год такова:

Относительное число точек во 2-й и 4-й квадрантах в процентах от общего числа в году указано на рис. 8. Можно было ожидать, что их больше всего будет в периоды высокой активности, когда корональные выбросы массы сильно возмущают спокойный солнечный ветер. Однако это не так и какой-либо отчетливой периодичности в этих данных не просматривается.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что двухвершинность распределения значений ММП не является артефактом усреднения, а отражает реальную структуру магнитного поля внутри сектора. При этом более часто встречается магнитное поле полярности, соответствующее ведущему пятну северного полушария.

С увеличением активности растет не только модуль магнитного поля, но и по отдельности поля каждой полярности. Расстояние между пиками увеличивается с 6 нТл до 10 нТл.

В попеременном усилении пиков наблюдается квази-22-летний цикл, в напряженности поля каждой полярности – 11-летний, а в отношении пиков к частоте встречаемости нулевых значений – квазидвухлетний (2.6 ± 0.3 года).

Приблизительно в 25% случаев классическая модель нарушается.

Настоящая работа поддержана грантами РФФИ 04-02-16763, 05-02-16090 и 05-02-17251.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бадалян О.Г., Обридко В.Н., Сикора Ю. Связь между поляризацией в зеленой линии и корональными магнитными полями // *Астрон. журн.* Т. 76. № 11. С. 869–880. 1999.
- Белов А.В., Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д. Связь характеристик солнечного ветра у земли с магнитным полем на поверхности источника // *Геомагнетизм и аэрномия.* Т. 46. № 4. С. 456–464. 2006.
- Веселовский И.С., Тарсина М.В. Угловое распределение межпланетного магнитного поля // *Геомагнетизм и аэрномия.* Т. 41. С. 471–476. 2001.
- Веселовский И.С., Дмитриев А.В., Орлов Ю.В., Персиянцев И.Г., Суворова А.В. Моделирование статистических распределений в пространстве параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля с использованием искусственных нейронных сетей // *Астрон. Вестник.* Т. 34. С. 131–138. 2000.
- Веселовский И.С., Дмитриев А.В., Суворова А.В., Минаева Ю.С. Структура долговременных изменений параметров плазмы и магнитного поля в околоземной гелиосфере // *Астрон. Вестник.* Т. 34. С. 82–93. 2000б.
- Обридко В. Н., Харишладзе А. Ф., Шельтинг Б.Д. Некоторые методические вопросы расчетов гармонических коэффициентов глобальных магнитных полей // *Сб. Магнитные поля Солнца и гелиосейсмология.* СПб. ФТИ. С. 71–80. 1994.
- Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д., Харишладзе А.Ф. Многопараметрические расчеты параметров солнечного ветра по данным о солнечном магнитном поле // *Астрон. Вестник.* Т. 38. № 3. С. 261–272. 2004.
- Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д., Харишладзе А.Ф. Расчеты магнитного поля в околоземном пространстве по данным о солнечном магнитном поле. // *Геомагнетизм и аэрномия.* Т. 46. № 3. С. 310–319. 2006.
- Badalyan O.G., Obridko V.N., Sykora J. Polarization in the 530.3 nm emission line and coronal magnetic field structure // *Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso.* V. 32. P. 175–189. 2002.
- Biermann L. Solar corpuscular variation and the interplanetary gas // *Observatory.* V. 77. P. 109–110. 1957.
- Hoeksema J. T., Scherrer P. H. The solar magnetic field-1976-through1985 // *UAG Report.* 94. WDC-A for Solar Terrestrial Physics. 1986.
- Ivanov E.V., Obridko V.N., Nepomnyashchaya E.V., Kutilina N.V. Relevance of CME to the structure of large-scale solar magnetic fields // *Solar Physics.* V.184, P.369–384. 1999.
- Ivanov E.V., Obridko V.N. The Cyclic Variations of the CME Velocity // *Solar Phys.* V. 19. P. 179–196. 2001.
- Obridko V.N., Shelting B.D. Cyclic variation of the global magnetic field indices // *Solar Phys.* V. 137. № 1. P. 167–177. 1992.
- Obridko V.N., Kharshiladze A.F., Shelting B.D. On calculating the solar wind parameters from the solar magnetic field data // *Astron. Astrophys Trans.* V. 11. P. 65–79. 1996.
- Obridko V.N., Shelting B.D. Structure and Cyclic Variations of open Magnetic Fields // *Solar Physics.* V. 187. P. 185–205. 1999a.
- Obridko V.N., Shelting B.D. Structure of the Heliospheric Current Sheet as Considered over a Long Time Interval (1915–1996) // *Solar Physics.* V. 184. P.187–200. 1999b.
- Parker E.N. Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields // *Astrophys. J.* V. 128. P. 664–676. 1958.
- Sykora J., Badalyan O.G., Obridko V.N. Relationship between the coronal shape and the magnetic field topology during the solar cycle // *Advances in Space Res.* V. 29. P. 395–400. 2002.