

УДК 523.98

## Магнитные связи солнечных образований внутри магнитоизолированных комплексов по наблюдаемым арочным структурам и расчетам силовых линий магнитного поля

*В.Г. Файнштейн<sup>2</sup>, В.М. Малащук<sup>1</sup>, Н.Н. Степанян<sup>1</sup>, Г.В. Руденко<sup>2</sup>, Я.И. Егоров<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, Научный, АР Крым, Украина, 98409  
*mvm@crao.crimea.ua*

<sup>2</sup> Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, а/я 291, Россия, 664033  
*vfain@iszf.irk.ru*

Поступила в редакцию 10 января 2013 г.

**Аннотация.** Магнитные связи солнечных образований внутри магнитоизолированных комплексов с областями вне комплексов были определены по петлеобразным структурам в верхней хромосфере и короне, а также по расчетам силовых линий магнитного поля. Найдено, что 65 % построенных силовых линий замыкаются внутри комплексов или не замыкаются на поверхности Солнца, а 35 % силовых линий пересекают границу комплекса. Короткие силовые линии, пересекающие границу комплекса, чаще всего соединяют точки с малой напряженностью. Концы длинных силовых линий совпадают с концами петлеобразных структур, более высокие части которых не видны в линии 17.1 нм. Короткие силовые линии совпадают по положению с петлеобразными структурами на уровне короны. Показано, что существует 3 типа изменения магнитного поля с высотой над комплексами.

MAGNETIC CONNECTIONS OF SOLAR FORMATIONS INSIDE MAGNETO-IZOLATED COMPLEXES ON OBSERVATIONS OF ARC STRUCTURES AND CALCULATIONS OF MAGNETIC FIELD LINES, *by V.G. Fainshtein, V.M. Malashchuk, N.N. Stepanian, G.V. Rudenko, Ya.I. Egorov.* The magnetic connections of solar formations inside magneto-izolated complexes with areas outside the complexes were determined from the loop structures in the upper chromosphere and corona, as well as from calculations of magnetic field lines. It was found that 65 % of the constructed field lines are closed within complexes or not closed on the solar surface, and 35 % of the field lines intersect the boundary of the complex. Short field lines, intersecting the boundary of the complex, often join the points of low intensity. The ends of the long field lines coincide with ends of the arc structures, higher parts of which are not visible in 17.1 nm line. Short field lines coincide in position with the loop structures at the corona level. It was shown that there are 3 types of magnetic field variations with a height above the complexes.

**Ключевые слова:** Солнце, комплексы солнечных образований

---

## 1 Введение

Солнечная атмосфера структурирована элементами с широким диапазоном масштабов. Одним из ее самых ярких структурных элементов являются активные области (АО). Для них характерны повышенные плотность и температура плазмы, более сильные и сложные магнитные поля, повышенная вспышечная и другого типа активность. В хромосфере АО наблюдаются как области повышенной яркости в линии H-альфа, так и более темные области в линии HeI с  $\lambda = 1083$  нм. Вне активных областей наблюдаются корональные дыры и обширные участки спокойных областей солнечной атмосферы. Напомним, что по наблюдениям в линии HeI 1083 нм, корональные дыры (КД) – это области, имеющие повышенную яркость и характеризующиеся исчезновением или размытием хромосферной сетки. Другими словами, КД имеют пониженный контраст по сравнению с другими областями солнечной атмосферы.

В течение длительного времени считалось, что спокойные области Солнца, независимо от места их расположения, мало различаются по своим свойствам. В работе Маланушенко (1995) было показано, что к КД часто примыкают “промежуточные” области (ПО) – участки спокойных областей с особыми свойствами. В них выполняется только одна из двух характеристик КД – повышенная яркость. В промежуточной области яркость чаще оказывается больше, чем в других участках спокойных областей, но меньше, чем в КД. В то же время хромосферная сетка вполне отчетливо наблюдается в “промежуточных” областях. Другими словами, контраст в них практически такой же, как в остальных участках спокойной области.

В работе Малащук и др. (2012) было введено понятие комплекса солнечных образований (далее комплексы). Комплексы, как крупномасштабные образования солнечной атмосферы, обнаруживаются визуально на изображениях Солнца в линии HeI 1083 нм. Они представляют собой светлые кольца, состоящие из КД и ПО, окружающие одну или несколько АО. В комплексе можно довольно четко выделить внешнюю границу, хотя она не может быть представлена в виде непрерывной линии, в том числе изолинии магнитного поля. Диаметр светлого кольца составляет десятки градусов на уровне хромосферы Солнца. Малащук и др. (2012) предположили, что комплексы солнечных образований являются магнитоизолированными и представили некоторые аргументы в поддержку этого предположения. Здесь под “магнитоизолированностью” комплекса понимается тот факт, что из комплекса наружу выходит относительно небольшой магнитный поток.

В данной статье продолжается исследование рассмотренных ранее крупномасштабных магнитоизолированных комплексов солнечных образований (Малащук и др., 2012; Малащук, Степанян, 2012). В работе Малащук и др. (2012) основное внимание было обращено на распределение магнитного поля внутри таких комплексов и на характер магнитной связи комплекса с окружающими структурами. В статье Малащук, Степанян (2012) характеристикой магнитного поля в комплексах были арочные структуры, наблюдаемые на двух уровнях в атмосфере Солнца. В анализе не участвовали расчеты магнитного поля на разных уровнях в атмосфере Солнца.

В настоящей статье мы опираемся на расчеты силовых линий магнитного поля, расчеты радиальной компоненты магнитного поля на разных высотах в атмосфере Солнца и на изображения Солнца в двух линиях, соответствующих верхней хромосфере и короне.

## 2 Материал наблюдений

В работе были использованы следующие данные для периода март 2000 г. – декабрь 2002 г.:

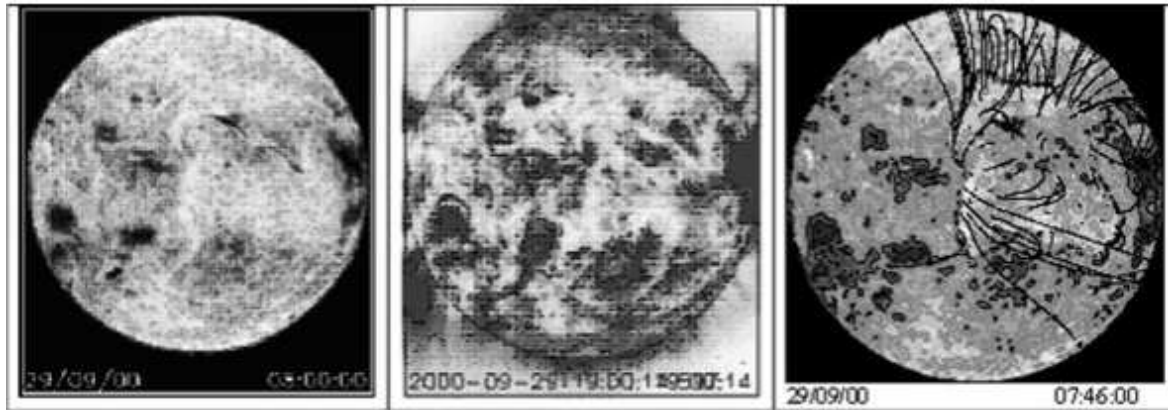
- изображения Солнца в линии HeI  $\lambda$  1083 нм, полученные на универсальном спектрофотометре телескопа БСТ-2 НИИ “КрАО”;
- изображения Солнца в линии FeIX-X  $\lambda$  17.1 нм, полученные инструментом EIT, установленным на борту космического аппарата SOHO, взяты нами из архивов INTERNET для дней наблюдений на БСТ-2. Описание прибора EIT дано в сборнике Флек и др. (1995). Там же приведены температуры, характерные для этих линий.  
Fe IX, X  $\lambda$  171 E  $1.3 \cdot 10^6$  K,

Fe XII  $\lambda$  195 E  $1.6 \cdot 10^6 K$ ,

Fe XV  $\lambda$  284 E  $2.0 \cdot 10^6 K$ ;

- силовые линии магнитного поля из выбранных точек на поверхности Солнца внутри комплексов, полученные в ИСЗФ СО РАН.

Пример изображений Солнца в двух линиях с нанесенной границей комплекса и рассчитанными силовыми линиями поля дан на рис. 1.



**Рис. 1.** Комплекс 29 сентября 2000 г. Слева направо: изображение Солнца в линии HeI  $\lambda$  1083 нм, негатив изображения Солнца в линии 17.1 нм, изображение Солнца в линии HeI  $\lambda$  1083 нм с нанесенной границей комплекса и рассчитанными силовыми линиями поля

### 3 Расчет силовых линий магнитного поля

Для расчета силовых линий магнитного поля, исходящих из любой точки на поверхности Солнца, была разработана оригинальная программа (автор Г.В. Руденко) с удобным интерфейсом. Программа включает в себя также возможность определения параметров рассчитанных силовых линий (координаты концов линий, длину линий, распределение компонент поля вдоль линий и др.), а также возможность совмещения совокупности рассчитанных силовых линий поля с ежедневными магнитограммами и с изображениями Солнца в различных спектральных диапазонах.

Расчету силовых линий поля предшествовал расчет магнитного поля в короне в потенциальном приближении с использованием Vd-технологии (Руденко, 2001). Суть этой технологии заключается в том, что при решении задачи Лапласа для потенциала магнитного поля в качестве граничного условия на всей видимой поверхности Солнца используется “мгновенное” (усредненное лишь за время измерения магнитограммы) распределение измеряемой продольной компоненты магнитного поля (Vd-компоненты). Для этого используются магнитограммы высокого пространственного разрешения. До сентября 2003 г. это были магнитограммы, получаемые в Национальной солнечной обсерватории Китт-Пик (Kitt Peak National Observatory). Этот метод позволяет получать “мгновенные” распределения магнитного поля над видимой поверхностью Солнца до поверхности источника – сферы радиусом  $R_S = 2.5R_\odot$  ( $R_\odot$  – радиус Солнца). С помощью этих распределений магнитного поля в расчетной области, включая область измерения поля в фотосфере (“поверхность” Солнца), могут быть определены все компоненты магнитного поля, а также модуль поля. В этом случае в результате расчетов на поверхности Солнца обеспечивалось пространственное разрешение  $33.4''$ .

По наблюдениям в линии HeI 1083 нм были отобраны 10 комплексов – структур, обладающих внешним ярким кольцом и внутренней зоной, содержащей спокойные и активные области. Для них

были построены силовые линии, начинающиеся из выбранных точек внутри комплексов. Часть рассчитанных силовых линий замыкается во внутренних областях комплексов, другие уходят в межпланетное пространство и, наконец, часть линий замыкается на участках Солнца вне комплексов. Результаты подсчета количества силовых линий этих трех типов представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Расположение силовых линий магнитного поля

Число комплексов	Общее число силовых линий	Линии замыкаются внутри комплекса	Открытые силовые линии	Линии замыкаются за пределами комплекса
10	715 100 %	378 53 %	85 12 %	252 35 %

65 % силовых линий замыкаются внутри комплексов или выходят за пределы Солнца, а 35 % замыкаются вне комплекса. В нескольких случаях в линии HeI  $\lambda$  1083 нм можно внести изменения ранее проведенных границ. Сдвиг границ на край промежуточных областей уменьшит число силовых линий, которые замыкаются за пределами комплекса, и увеличит число силовых линий, замыкающихся внутри него. Заметим, что указанные доли различных типов силовых линий не являются достаточно объективной характеристикой этих типов силовых линий, т. к. выбор мест, откуда выходили рассчитанные линии поля, не был формализован, и в результате плотность мест, откуда выходили рассчитанные линии поля, менялась в пределах каждого комплекса. В частности, с наименьшим шагом (т. е. наиболее часто) мы рассчитывали силовые линии поля вблизи границы комплекса. Но поскольку количество рассмотренных силовых линий разного типа в 10 комплексах относительно велико, можно предположить, что отклонение истинных долей трех типов линий поля от долей, полученных с использованием нашей процедуры построения силовых линий поля, невелико.

#### **Особенности расположения силовых линий в комплексах**

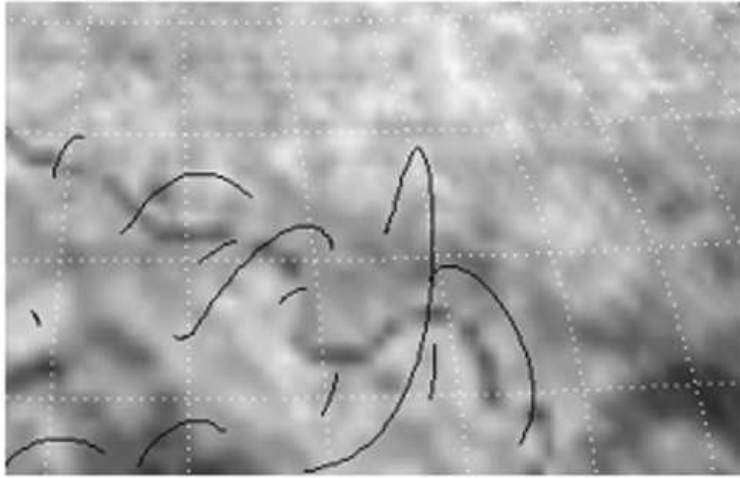
Силовые линии, исходящие из точек, расположенных вблизи границ комплекса, чаще всего замыкаются на границе комплекса или вне его в близких к границе точках с малой напряженностью магнитного поля. Пример таких границ дан на рис. 2.

Замыкание силовых линий магнитного поля в далеких от комплекса областях часто происходит при отсутствии связи с близлежащими областями. Пример такой ситуации можно увидеть на рис. 3. На нем видно, что ни одна силовая линия, начинающаяся внутри комплекса, не попадает в крупную активную область, расположенную к востоку от комплекса (на рисунке – темная область слева от комплекса).

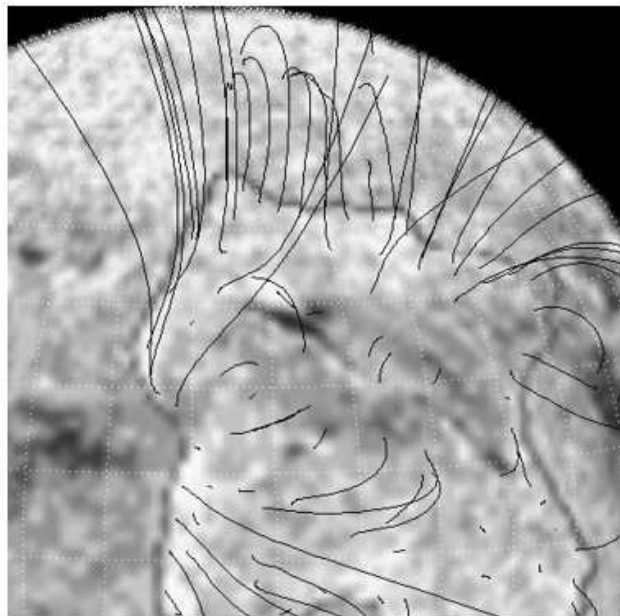
## **4 Сравнение положений силовых линий магнитного поля и наблюдаемых арочных корональных структур**

Излучение в линии 17.1 нм выходит из области короны с температурой  $1.3 \cdot 10^6 K$ . Это соответствует высотам  $1.3-2 R_{\odot}$ , где  $R_{\odot}$  – радиус Солнца. Из расчетов магнитного поля в короне в потенциальном приближении следует, что вершины замкнутых силовых линий поля могут достигать высоты примерно  $(2.2-2.4) R_{\odot}$  при радиусе поверхности источника  $R_S = 2.5 R_{\odot}$ . То есть надеяться на совпадение высоких силовых линий с наблюдаемыми арочными структурами не приходится. Тем не менее, мы провели сравнение положений силовых линий и арочных структур, наблюдаемых в линии 17.1 нм.

Изображения Солнца с нанесенными силовыми линиями были наложены на изображения Солнца в линии 17.1 нм. Затем определялось наличие петлеобразных структур, совпадающих с концами



**Рис. 2.** Часть изображения Солнца в линии HeI  $\lambda$  1083 нм 11 июля 2000 г. с нанесенной границей комплекса (комплекс внизу от границы – сплошной толстой линией) и рассчитанными силовыми линиями поля возле нее



**Рис. 3.** Часть диска Солнца в линии HeI  $\lambda$  1083 нм с нанесенной границей комплекса и рассчитанными силовыми линиями магнитного поля за 29 сентября 2000 г.

силовых линий, и их направление. Выявлены следующие закономерности. Короткие, а следовательно, и низкие силовые линии в большинстве случаев совпадают по длине и направлению с корональными арками. Основания высоких силовых линий в короне часто совпадают с точечным концом структуры, расположенной в направлении силовой линии. Второй конец этой структуры размыт. Иногда для замкнутой силовой линии можно разглядеть такие корональные структуры на обоих ее концах.

В линии HeI  $\lambda$  1083 нм картина подобная, но менее четкая. По-видимому, это результат низкого пространственного разрешения в линии HeI  $\lambda$  1083 нм и большой разницы во времени наземных и космических наблюдений

Из проведенного сравнения можно сделать вывод о том, что нижние части и направления расчетных силовых линий хорошо совпадают с основаниями высоких петлеобразных структур и с их направлениями. Низкие же петлеобразные структуры целиком совпадают с короткими силовыми линиями.

## 5 Крупномасштабное поле в области комплексов на разных высотах

Рассматривается структура магнитного поля над комплексами в интервале высот от фотосферы до поверхности источника (от  $R_o$  до  $2.5 R_{\odot}$ , где  $R_o$  – радиус фотосферы). Синоптические карты радиальной компоненты магнитного поля Солнца  $B_R$  были рассчитаны для восьми высот в атмосфере Солнца. Методика расчетов и построения карт подробно описана в работе (Файнштейн и др., 2011). Пример синоптических карт на уровне фотосферы ( $H_0 = R_{\odot}$ ) и на высоте  $H_6 = 2.5 R_{\odot}$  приведен на рис. 4.

Изображения в линии HeI  $\lambda$  1083 нм рассматриваемых 10 комплексов переводились в гелиографические координаты и накладывались на синоптические карты соответствующего оборота на всех высотах с нанесенными нулевыми линиями магнитного поля. Пример дан на рис. 5.

Анализ всех карт приводит нас к выводу о существовании трех типов изменения конфигурации магнитного поля с высотой над комплексами.

### I тип

На высоте  $H = R_{\odot}$ . В области комплекса наблюдается большая кольцевая униполярная область, занятая корональными дырами, промежуточными областями. Внутри этой кольцевой зоны находятся структуры со смешанной полярностью. С ростом высоты площадь структур с полярностью, противоположной полярности кольцевой зоны, становится все меньше, и на высоте  $H = 2.5 R_{\odot}$  над комплексом наблюдается большая униполярная область, знак поля которой совпадает со знаком поля во внешнем кольце. На рис. 5 представлен комплекс такого типа.

Из 10 рассмотренных нами комплексов 6 относятся к первому типу.

### II тип

На высоте  $H = R_{\odot}$  комплекс занимает область, содержащую поля обоих знаков примерно в равных долях. На высоте  $H = 2.5 R_{\odot}$  нулевая линия магнитного поля делит комплекс приблизительно пополам. Выделено 3 комплекса второго типа. Пример II типа комплексов – на рис. 6.

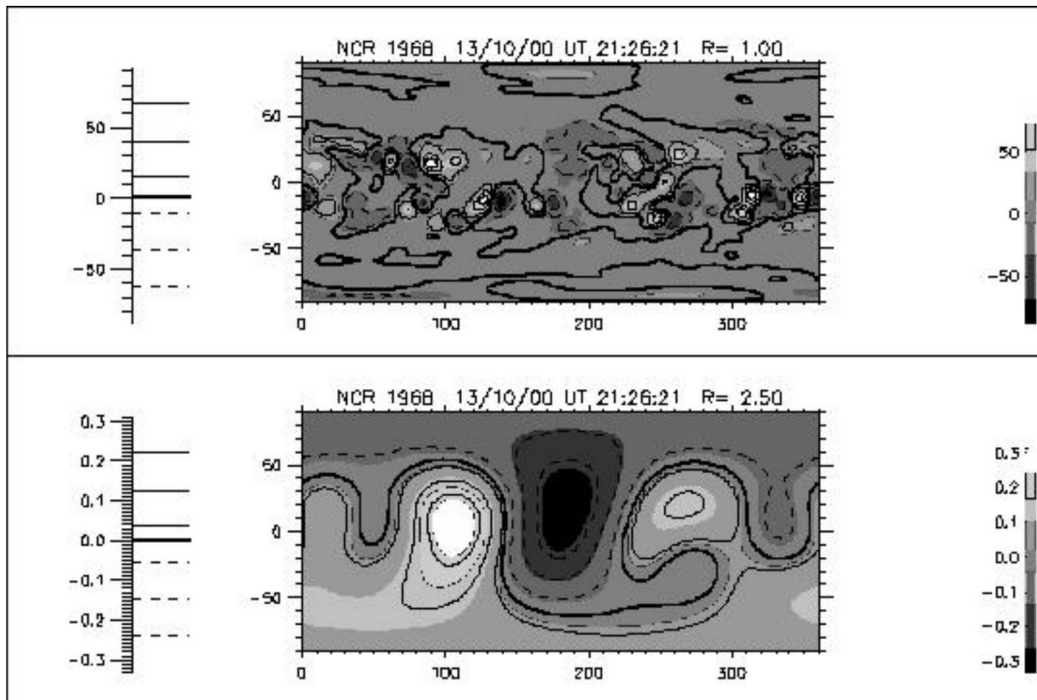
### III тип

На высоте  $H = R_{\odot}$  комплекс соответствует параметрам типа I, а на высоте  $H = 2.5 R_{\odot}$  наблюдается ситуация, характерная для типа II. Выделен 1 комплекс третьего типа (рис. 7).

## 6 Результаты

Сравнение магнитных связей солнечных образований по арочным структурам и расчетам силовых линий магнитного поля показало следующее:

- 65 % силовых линий магнитного поля замыкаются внутри комплексов или не замыкаются на поверхности Солнца, а 35 % силовых линий пересекают границу комплекса.

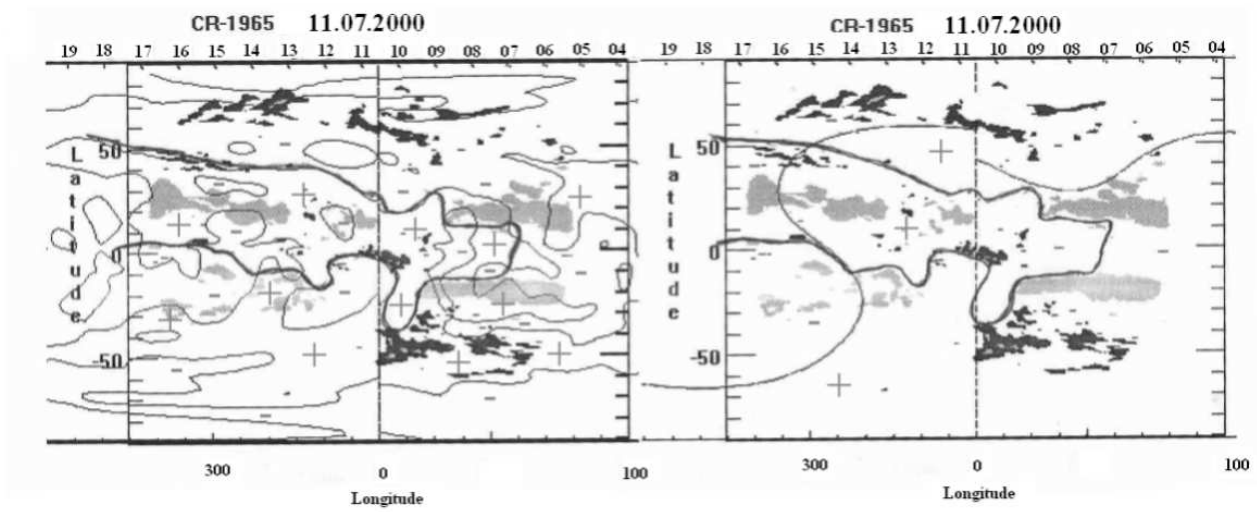


**Рис. 4.** Синоптические карты радиальной компоненты магнитного поля  $B_R$  для кэррингтоновского оборота CR1968 на высотах  $H = R_\odot$  и  $H = 2.5 R_\odot$ . Слева сплошными и пунктирными отрезками показаны значения  $B_R$ , для которых на синоптических картах нанесены изолинии. Справа на тоновом изображении показаны шкалы изменения значений  $B_R$

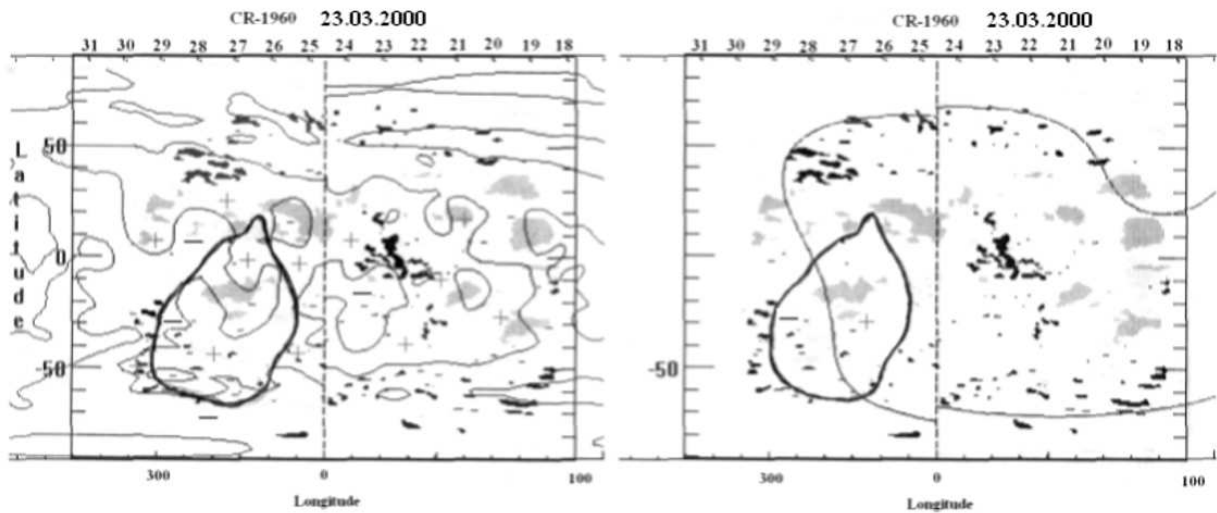
- Короткие силовые линии, пересекающие границу комплекса, чаще всего соединяют точки с малой напряженностью.
- Силовые линии, замыкающиеся в далеких от границ комплекса областях, не связывают близко лежащие от комплекса области.
- Короткие силовые линии поля в промежуточных областях совпадают по положению с петлеобразными структурами на уровне короны.
- Концы длинных силовых линий совпадают с концами петлеобразных структур, наблюдаемых в линии 17.1 нм, более высокие части которых в этой линии не видны.
- Наблюдается 3 типа изменения магнитного поля с высотой над комплексами: в одном случае преимущественная полярность в комплексе сохраняется с высотой вплоть до поверхности источника; в другом случае на поверхности источника комплекс разделяется примерно пополам нейтральной линией магнитного поля; в третьем типе на высоте  $H = R_\odot$  комплекс соответствует параметрам первого типа, а на высоте  $H = 2.5 R_\odot$  наблюдается ситуация, характерная для второго типа комплексов.

## 7 Заключение

Исследованы некоторые свойства новых объектов в солнечной атмосфере – комплексов солнечных образований. Эти образования включают в себя одну или несколько активных областей и окружающих их корональных дыр и промежуточных областей. Опираясь на свои предварительные исследования, авторы предположили, что комплексы солнечных образований являются магнито-изолированными. Это означает, что магнитный поток, выходящий из этих комплексов наружу,

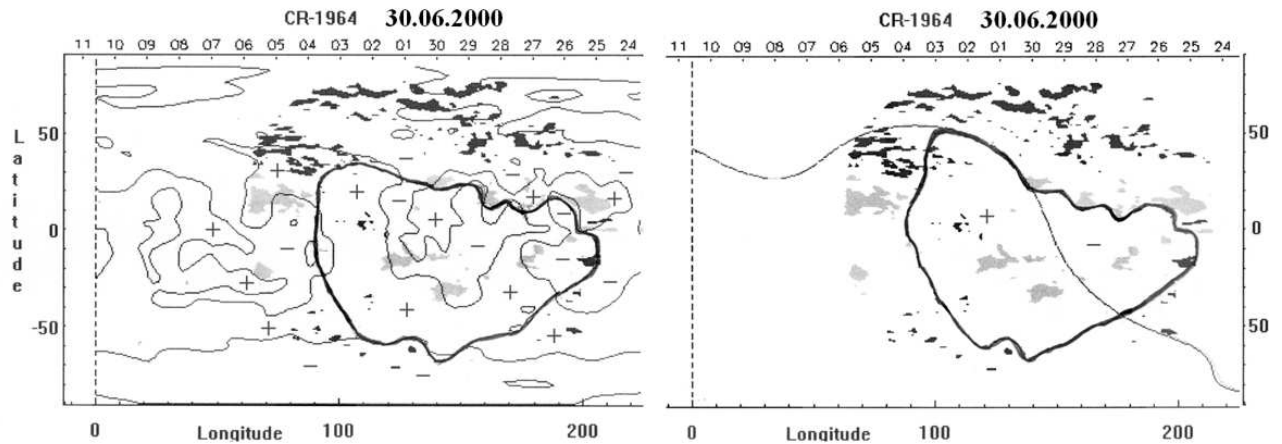


**Рис. 5.** Участки синоптической карты с комплексом 11.07.2000 на высотах  $R_{\odot}$  (слева) и  $2.5 R_{\odot}$  (справа). Границы комплекса нанесены жирной линией. Знаки “+” и “-” обозначают полярность магнитного поля в месте расположения знака



**Рис. 6.** Участки синоптической карты с комплексом 23.03.2000 на высотах  $R_{\odot}$  (слева) и  $2.5 R_{\odot}$  (справа). Границы комплекса нанесены жирной линией. Знаки “+” и “-” обозначают полярность магнитного поля в месте расположения знака





**Рис. 7.** Участки синоптической карты с комплексом 30.06.2000 на высотах  $R_{\odot}$  (слева) и  $2.5 R_{\odot}$  (справа). Границы комплекса нанесены жирной линией. Знаки “+” и “-” обозначают полярность магнитного поля в месте расположения знака

мал по сравнению с потоком поля преимущественной полярности внутри комплекса. Чтобы выяснить, действительно ли рассмотренные нами комплексы являются магнитоизолированными, мы построили множество силовых линий магнитного поля, начинающихся вблизи выделенных границ комплексов. Оказалось, что есть достаточно протяженные участки границ комплексов, через которые относительно большое количество линий поля переходит изнутри комплекса наружу. Доля всех силовых линий поля, выходящих наружу из рассмотренных комплексов, составила около 35 % от всех построенных силовых линий поля. Возможно, что это связано с неточностью определения границы комплекса. В нашем случае граница проводилась “вручную”, субъективно. В то же время небольшое исследование показало, что изменение некоторых участков границы может привести к уменьшению магнитного потока из комплекса наружу. Мы планируем алгоритмизировать процедуру нахождения границ комплексов, используя формальные критерии для нахождения границы комплекса солнечных образований. Это позволит более точно оценить степень магнитной изолированности комплексов солнечных образований.

В заключение заметим, что аналогия комплекса солнечных образований с корональной дырой, в которой образуется, эволюционирует и исчезает активная область, оставляет надежду на установление доказательств того, что рассматриваемые нами комплексы существуют и являются частью эволюции солнечной активности в рамках солнечного цикла.

Работа авторов из ИСЗФ частично поддержана ГК 14.518.11.7047 и Соглашением 8407 Минобрнауки РФ.

## Литература

- Маланушенко Е.В. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1995. Т. 89. С. 22.  
 Малащук В.М., Файнштейн В.Г., Степанян Н.Н., Руденко Г.В., Егоров Я.И. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2012. Т. 108. С. 105.  
 Малащук В.М., Степанян Н.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2012. Т. 109 (в печати).  
 Руденко (Rudenko G.V.) // Solar Phys. 2001. V. 198. P. 5.  
 Файнштейн и др. (Fainshtein V.G., Stepanian N.N., Akhtemov Z.S., Rudenko G.V., Silakova E.V.) // Bull. Crimean Astrophys. Obs. 2011. V. 107. P. 51.  
 Флек и др. (Fleck D., Domingo V., Poland A.I. eds.) // The SOHO Mission. Kluwer Academic Publishers. 1995. P. 291.