

УДК 523.98

Магнитоизолированные комплексы солнечных образований

В.М. Малащук¹, В.Г. Файнштейн², Н.Н. Степанян¹, Г.В. Руденко², Я.И. Егоров²

¹ НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, АР Крым, Научный
mvm@crao.crimea.ua; nataly@crao.crimea.ua

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

Поступила в редакцию 29 ноября 2011 г.

Аннотация. Вводится понятие крупномасштабного комплекса солнечных образований (МИКСО). Комплекс состоит из группы корональных дыр, активных областей и областей с промежуточными характеристиками между корональной дырой и невозмущенной (спокойной) областью. Особенностью таких комплексов является слабость связи магнитных полей внутри комплексов с магнитными полями вне их. Большинство силовых линий магнитного поля, выходящих из комплекса, оказываются либо открытыми, либо замкнутыми внутри него.

MAGNETO-ISOLATED COMPLEXES OF SOLAR STRUCTURES, *by V.M. Malashchuk, V.G. Fainshtein, N.N. Stepanian, G.V. Rudenko, Ya.I. Egorov.* The concept of the large-scale complex of solar formations with the isolated magnetic field is introduced. The complex includes the group of coronal holes, active regions and regions with intermediate characteristics between the coronal hole and the undisturbed region. The special feature of such complexes is weakness of the connection of magnetic fields inside the complexes with magnetic fields outside them. Most magnetic lines of force, emerging from the complex, prove to be either open or locked inside it.

Ключевые слова: Солнце, корональные дыры, активные области

1 Введение

Следует ожидать, что магнитная связь между крупномасштабными структурами солнечной атмосферы влияет на особенности эволюции таких структур, разнообразит и, возможно, усиливает проявления солнечной активности в них. В то же время слабая магнитная связь структур приводит к совершенно другому характеру активности в этих структурах и к другим особенностям их эволюции. Примером магнитосвязанных структур можно считать “Комплексы Активности”, объединяющие несколько соседних активных областей (Банин и др., 1991; Банин и Язев, 1991). Магнитная связь между такими АО существенно влияет, как считается, на интенсивность активности в них.

По наблюдениям в линии HeI 1083 нм корональные дыры (КД) являются областями повышенной яркости с отсутствующей или размытой хромосферной сеткой. Иными словами, КД имеют пониженный контраст по сравнению с другими областями солнечной атмосферы. Обычно КД расположены в униполярных областях крупномасштабного магнитного поля (Зиркер, 1977). Силовые линии поля, выходящие из них, являются в этом случае открытыми. Они начинаются на поверхности Солнца и уходят в межпланетное пространство. Анализ магнитограмм с высоким разрешением

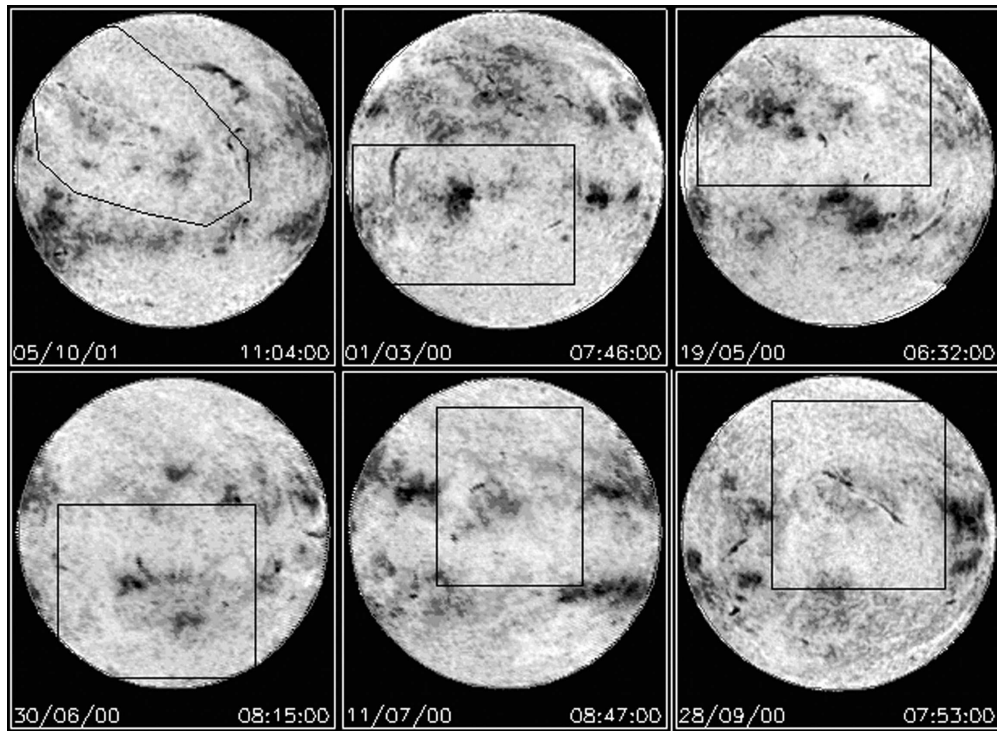


Рис. 1. Изображения Солнца в линии HeI λ 1083 нм с отмеченными прямоугольниками магнитоизолированными комплексами солнечной структуры

показывает, что в КД наблюдаются магнитные поля обеих полярностей. Силовые линии поля из некоторых точек КД оказываются замкнутыми. Но тем не менее в КД преобладает магнитное поле одного знака (Ванг, 2009). Иными словами, КД имеют большую степень “разбаланса” магнитного потока, чем другие области.

В работе Маланушенко (1995) было показано, что к КД часто примыкают “промежуточные” области (ПО). В ПО яркость чаще оказывается больше, чем в невозмущенных областях, но меньше, чем в КД. Контраст практически такой же, как в невозмущенных областях.

В настоящей работе мы хотим высказать предположение и привести некоторые аргументы в его поддержку о существовании относительно магнитоизолированных комплексов солнечных образований (далее МИКСО или комплексы) и обсудить некоторые их свойства. Под магнитной изоляцией мы понимаем слабую связь с помощью магнитного поля комплекса с окружающими участками солнечной атмосферы. На языке физики это означает, что магнитный поток, выходящий из комплекса, существенно меньше, чем магнитный поток поля каждого знака в комплексе. 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 активных областей (АО). В комплексе можно довольно четко выделить внешнюю границу, хотя она не может быть представлена в виде непрерывной линии, в том числе изолинии. Диаметр светлого кольца составляет десятки градусов на поверхности Солнца.

Несколько примеров комплексов приведены на рис. 1. На изображениях Солнца в линии HeI λ 1083 нм прямоугольниками грубо отмечены положения комплексов. В следующих разделах работы мы обсудим некоторые свойства комплексов, обращая основное внимание на распределение магнитного поля на различных высотах и на характер магнитной связи комплексов с окружающими структурами.

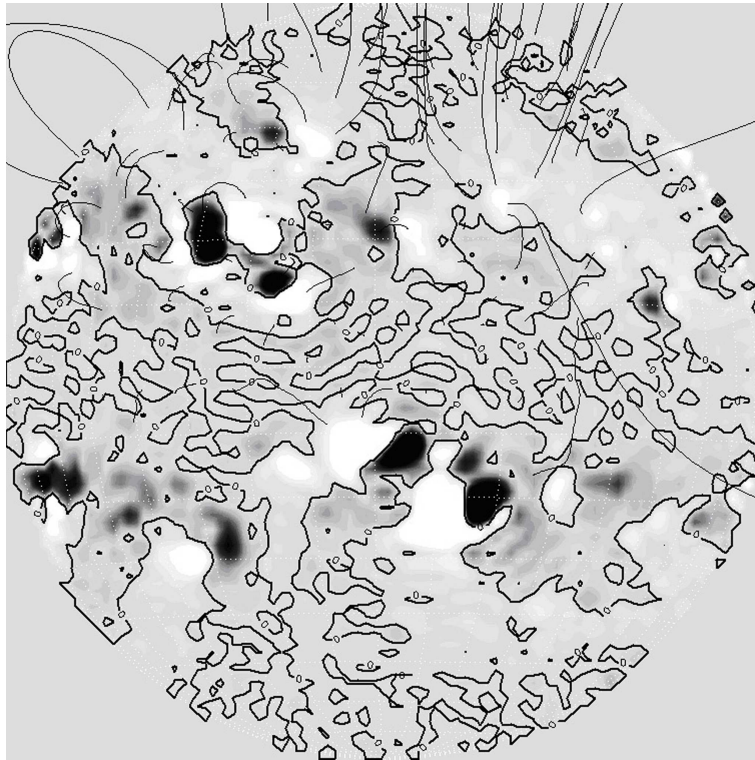


Рис. 2. Нулевые линии радиальной компоненты магнитного поля B_r (жирные линии) и небольшое количество рассчитанных силовых линий (тонкие линии) нанесены на карту B_r – радиальная компонента магнитного поля на видимом диске Солнца 19.05.2000

2 Исходный материал

Исходным материалом послужили следующие данные для периода март 2000 г. – сентябрь 2005 г. (кэррингтоновские обороты CR1960-CR2034):

1. Изображения Солнца в инфракрасной линии HeI λ 1083 нм, полученные с универсальным спектрофотометром телескопа БСТ-2 НИИ “КрАО”. Часть из них представлена на рис. 1.
2. Ежедневные магнитограммы полного диска Солнца, полученные в обсерватории Китт-Пик.

3 Обработка наблюдательного материала

3.1 Построение силовых линий магнитного поля

Для выяснения свойств магнитного поля в МИКСО проводились расчеты 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 (NSO). 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 $\approx 33.4''$.

По данным расчетов магнитного поля с использованием Vd-технологии были решены задачи:

- Нахождение распределений значений любой компоненты магнитного поля в зависимости от широты, долготы и высоты над поверхностью Солнца.
- Построение изолиний значений этих компонент поля над всей видимой поверхностью Солнца.
- Расчет силовых линий магнитного поля из любой точки на поверхности Солнца, определение параметров этих линий поля и свойства поля вдоль них.

Программа построения силовых линий поля позволяет также совмещать распределения компонент поля на видимой поверхности Солнца и изображения Солнца, полученные в различных спектральных диапазонах. Это позволяет исследовать свойства магнитного поля в различных структурах солнечной атмосферы.

3.2 Синоптические карты радиальной компоненты магнитного поля, рассчитанные для девяти высот в атмосфере Солнца

Подробное описание этих расчетов дано в работе (Файнштейн и др., 2011). Пример синоптических карт одного кэррингтоновского оборота для нескольких высот в атмосфере Солнца приведен на рис. 3. Высоты, для которых проведены расчеты положений нулевых линий, даны в табл. 1.

Таблица 1. Высоты в радиусах Солнца (R_\odot), для которых были построены синоптические карты радиальной компоненты магнитного поля Солнца

Высота в R_\odot	1	1.0036	1.0144	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50
--------------------	---	--------	--------	------	------	------	------	------	------

4 Анализ наблюдений

По наблюдениям в линии HeI $\lambda 1083$ нм были отобраны 12 структур, обладающих внешним ярким кольцом и внутренней зоной, содержащей невозмущенные и активные области. Для них были определены расположения силовых линий и проведены расчеты напряженности магнитного поля на десяти высотах.

Для всех этих комплексов часть рассчитанных силовых линий, выходящих из внешнего кольца комплекса, замыкается во внутренних областях, часть оказывается открытыми (т. е. уходят в межпланетное пространство) и, наконец, часть линий выходит из комплекса и замыкается на участках Солнца вне комплексов.

4.1 Описание комплексов

Ниже приводится описание шести из двенадцати комплексов, вошедших в эту работу. На магнитограммах для отдельных дней наблюдений и на синоптических картах светлые области соответствуют положительной полярности (N-поле), а темные области – отрицательной полярности (S-поле). Жирной линией вручную проведена внешняя граница комплекса – более точно, чем прямоугольник, но все еще отличающаяся от точной границы.

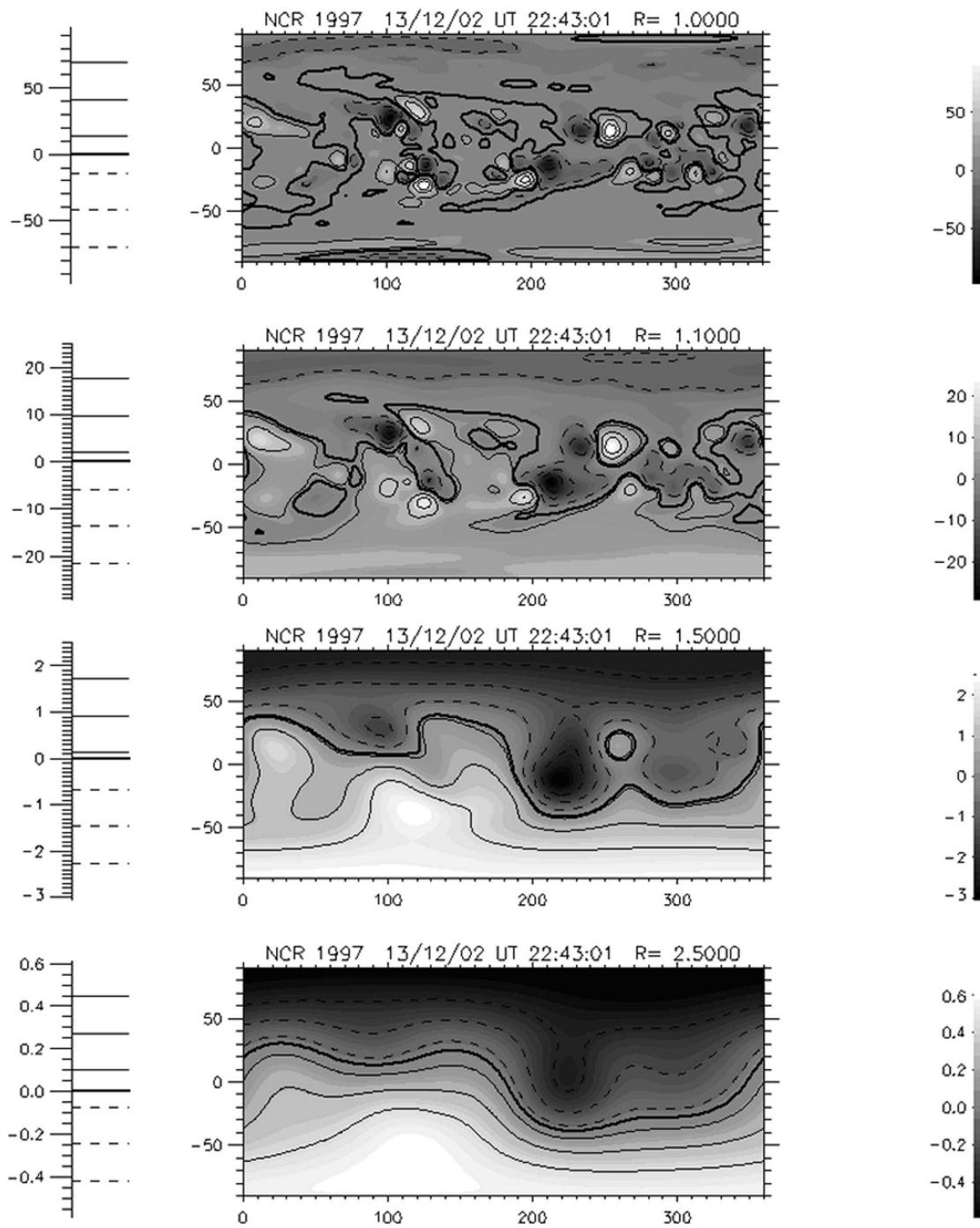


Рис. 3. Синоптические карты оборота CR1997, рассчитанные для нескольких высот. Слева от синоптической карты сплошными и пунктирными отрезками показаны значения B_r , для которых на синоптических картах нанесены изолинии. Справа показаны шкалы изменения значений B_r на тоновом изображении распределения величины B_r .

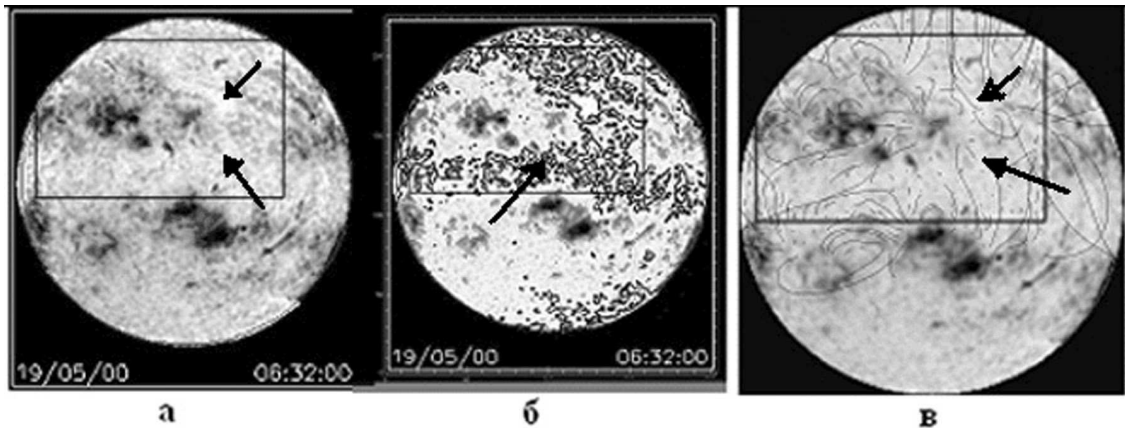


Рис. 4. Комплекс 19 мая 2000 г. Подробное описание в тексте

Комплекс 19 мая 2000 г.

На рис. 4 показано изображение Солнца в линии HeI λ 1083 нм (а), зарегистрированное 19.05.2000; изолинии яркости (б), позволяющие выделить активные области (изолинии показаны пунктиром), корональные дыры (одна КД указана стрелкой в северной части диска) и промежуточные области (одна ПО показана стрелкой в центральной зоне диска), а также силовые линии магнитного поля, проведенные из разных точек поверхности Солнца. Прямоугольником на рис. 4 (а и б) грубо выделен комплекс, расположенный в северном полушарии. Более точно границу комплекса можно провести, очертив снаружи промежуточную область, которая на севере доходит до северного полюса и, возможно, заходит на невидимую сторону Солнца, а на западе местами доходит до западного лимба.

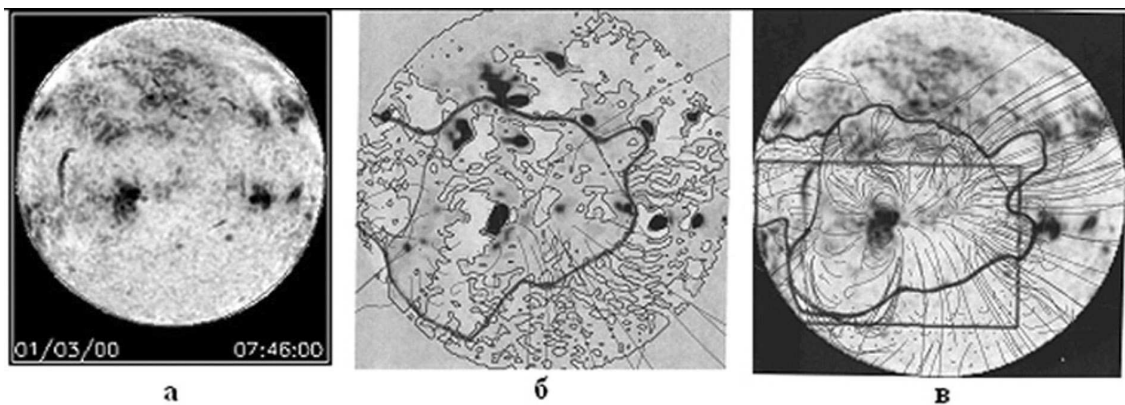


Рис. 5. а) Изображение Солнца в линии HeI λ 1083 нм 1 марта 2000 г. Прямоугольником (рис. (в)) грубо отмечено расположение комплекса; б) магнитограмма Солнца за тот же день с нанесенными нулевыми линиями B_r и силовыми линиями поля; в) рассчитанные силовые линии, нанесены на изображение в линии HeI λ 1083 нм. Сплошная жирная линия на рис. (б) и (в) – граница комплекса (см. текст)

Вывод об относительной магнитной изоляции комплекса можно сделать, проследив за силовыми линиями поля в окрестности южной границы комплекса. Видно, что есть протяженные участки этой границы, в окрестности которых линии поля параллельны границе по обе ее стороны, либо перпен-

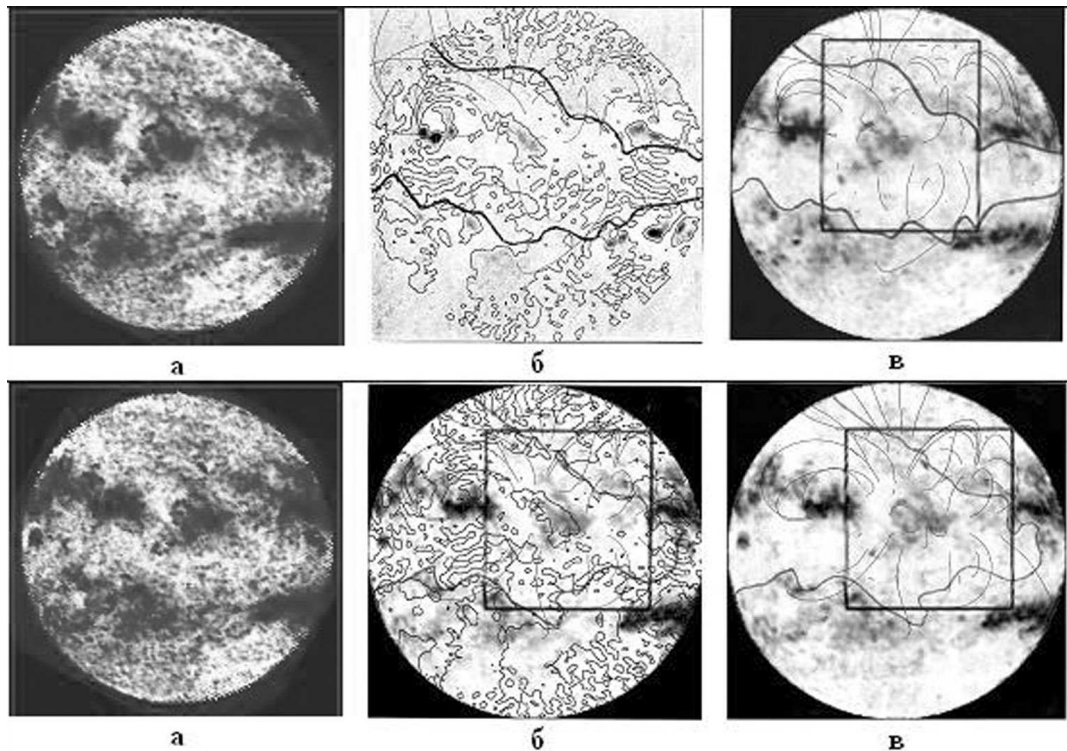


Рис. 6. То же, что и на рис. 5, для наблюдений 11 июля 2000 г. (верхний ряд) и 12 июля (нижний ряд)

дикулярны границе, но не пересекают ее. В то же время есть силовые линии, которые проходят над границей, связывая комплекс с окружающими участками Солнца. Мы попытались сделать грубую оценку доли магнитного потока, которую уносят эти силовые линии из комплекса по сравнению с потоком поля одного знака из КД и ПО-комплекса. Эта доля не превышает, по-видимому, 5–10%. Если предположить, что аналогичная ситуация происходит на всей границе, то доля уходящего из комплекса магнитного потока не превышает 20–40%.

Вопрос об относительной магнитной изоляции следующих комплексов пока рассматривается как предположение, основанное на качественном анализе ограниченного количества силовых линий магнитного поля.

Комплекс 1 марта 2000 г.

Комплекс расположен в южной полусфере. По долготе он занимает более 120° . Обширная область S-поля промежуточной яркости с двумя небольшими КД, АО и волокном окружает зону N-поля (рис. 5).

На рис. 5 видно, что рассчитанные силовые линии из внешней S-области (темные зоны) в большинстве случаев уходят с поверхности Солнца. Замкнутые силовые линии связывают отдельные точки S-области комплекса с его внутренними частями N-полярности (светлые области).

Комплекс 11 и 12 июля 2000 г.

Комплекс расположен вблизи центрального меридиана и захватывает по широте оба полушария. По долготе он занимает около 180° . Его восточный край 12 июля находится на лимбе. Яркое внешнее кольцо комплекса расположено в области N-полярности. Внутренняя зона комплекса состоит из двух областей S-полярности. Силовые линии соединяют их с N-областями внутри комплекса (рис. 6).

Комплекс 5 октября 2001 г.

Комплекс занимает протяженную область N-поля в обеих полусферах (рис. 7).

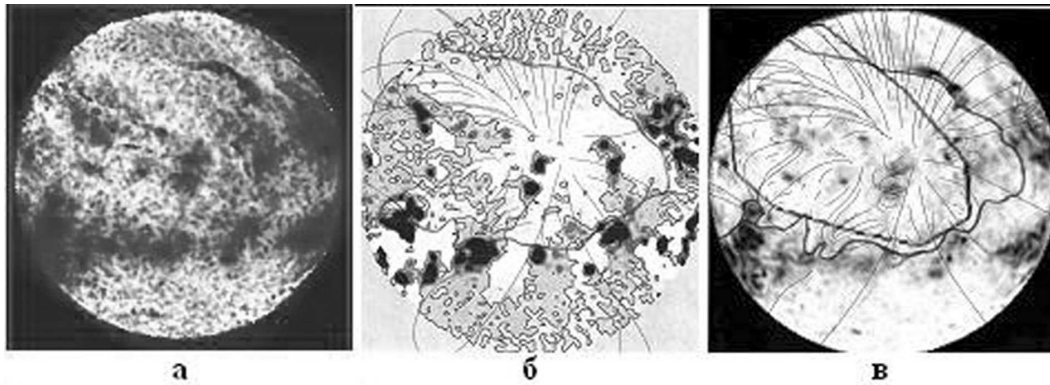


Рис. 7. То же, что и на рис. 5, для комплекса 5 октября 2001 г.

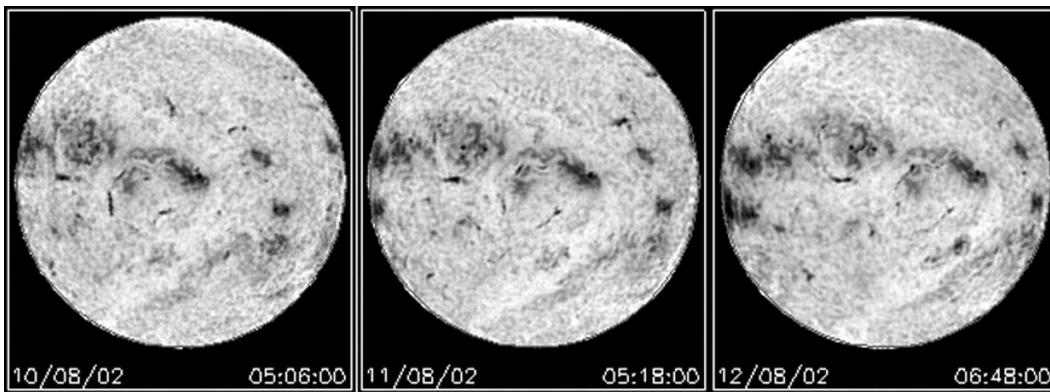


Рис. 8. Изображение Солнца в линии HeI λ 1083 нм 10, 11 и 12 августа 2002 г.

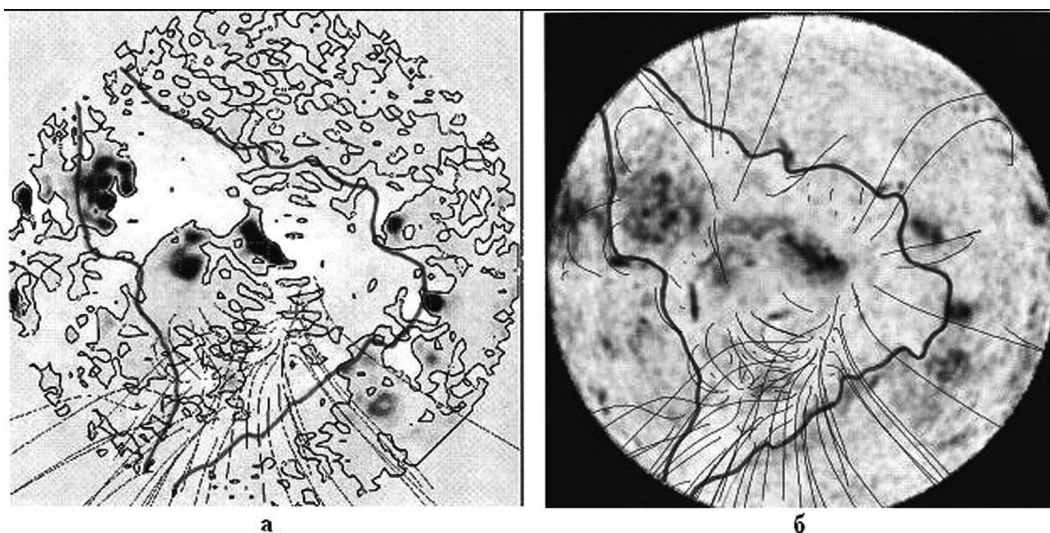


Рис. 9. а) Магнитограмма полного диска Солнца на уровне фотосферы для наблюдений 10 августа 2002 г.; б) Силовые линии нанесены на изображение Солнца в линии HeI λ 1083 нм

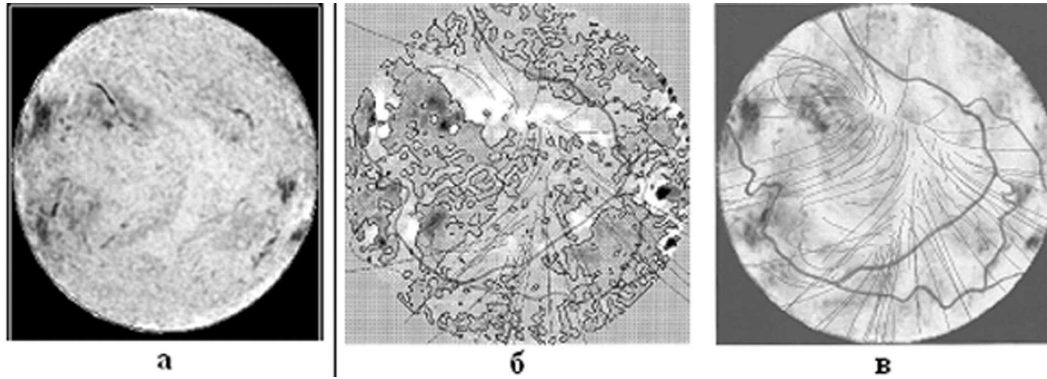


Рис. 10. То же, что и на рис. 4, для комплекса 26 декабря 2002 г.

Комплекс 10–12 августа 2002 г.

Комплекс занимает обширную область в обеих полусферах Солнца. Его внешнее кольцо на юге и западе состоит из протяженной КД, в которой быстро развивается АО. Остальные границы состоят из узких областей промежуточной яркости. Вид Солнца в линии HeI λ 1083 нм за эти дни показан на рис. 8. На рис. 9 даны магнитограмма за 10 августа 2002 г. и силовые линии, нанесенные на изображение Солнца в линии HeI λ 1083 нм.

Комплекс 26 декабря 2002 г.

В этом случае мы также видим большую область N-поля с небольшими КД и ПО, окружающую зону S-поля с АО и ПО (рис. 10).

Таблица 2. Изменение магнитного поля с высотой в области комплексов

№ п/п	Дата наблюдения комплекса	№ кэрринг-тоновского оборота	Долгота центра комплекса (градусы)	Знак поля внешнего кольца комплекса на $H = R_{\odot}$	Высота H_K превращения поля в униполярное (в радиусах Солнца R_{\odot})	Знак униполярного поля на высоте H_K
1	1.03.2000	1959	298	S	1.15	S
2	19.05.2000	1962	331	N	1.50	N
3	11.07.2000	1964	352	N	1.50	N
4	5.10.2001	1981	155	N	1.25	N
5	10.08.2002	1992	40	N	1.50	N
6	26.12.2002	1997	20	N	1.50	N

5 Изменение магнитного поля с высотой в области комплексов

Для всех выявленных комплексов было найдено изменение магнитного поля с высотой. Были определены гелиографические координаты центров комплексов. После этого по синоптическим картам для соответствующих оборотов было прослежено изменение с высотой магнитного поля в области комплекса. Общая закономерность изменения поля такова. На уровне фотосферы ($H = R_{\odot}$), как было показано выше, внутри внешнего кольца комплекса, имеющего один знак поля, расположены

участки поля противоположного знака. С ростом высоты вкрапления поля, знак которого противоположен знаку поля во внешнем кольце, занимают все меньшую площадь. На некоторой высоте H_K на месте комплекса наблюдается большая униполярная область, знак поля которой совпадает со знаком поля во внешнем кольце. Более подробно этот результат для шести рассмотренных выше случаев приведен в табл. 2.

Как видно из табл. 2, магнитные поля внутренних частей комплекса простираются от 1.15 до 1.50 R_\odot .

6 Заключение

Обнаружены комплексы солнечных образований, имеющих, по-видимому, слабую магнитную связь с окружающими структурами короны (магнитоизолированные). Комплексы включают в себя корональные дыры, промежуточные области и активные области. Между элементами существует заметная магнитная связь. В КД преобладают открытые линии магнитного поля, но существуют и замкнутые. Часть силовых линий замыкается внутри КД, а часть выходит за границы КД и замыкается внутри АО, а частично в ПО и редко в КД или вне комплекса.

Магнитная связь комплекса с окружающими участками Солнца также существует, но она довольно слабая в том смысле, что маленький магнитный поток уходит из комплекса наружу. В следующей работе мы планируем более точно определить границы этих комплексов, находя места минимальной магнитной связи с окружающими областями Солнца. Предполагается количественно оценить долю магнитного потока, выходящего наружу, от потока одной полярности внутри комплекса.

Еще одна особенность магнитного поля в комплексе заключается в следующем: в КД и в ПО внешнего кольца комплекса одинаковая преобладающая полярность поля. С высотой вклад неосновной полярности поля уменьшается. Такие поля существуют до высоты, не превышающей примерно 1.5 R_\odot . Выше над комплексом формируется униполярная область магнитного поля с полярностью, которая была преобладающей на уровне фотосферы во внешнем кольце комплекса.

Ранее в работе Файнштейна и др. (2010) при рассмотрении силовых линий в отдельных КД с АО мы пришли к выводу об отсутствии связи магнитного поля АО внутри КД с полями АО вне КД. Кроме того, было получено, что, преимущественно, магнитные поля КД открытые, силовые линии, выходящие из КД, не замыкаются на поверхности Солнца.

Рассмотренные в этой работе комплексы в некотором смысле аналогичны КД с АО внутри нее. Конечно, площадь комплекса значительно больше площади КД. Комплекс содержит не только КД, но и ПО. Внутренняя часть комплекса, помимо АО, содержит и другие образования. Но характер расположения силовых линий и слабая связь магнитных полей внутренних частей, как комплекса, так и отдельной КД, с солнечными образованиями вне комплекса и отдельной КД очень близки.

Литература

- Банин В.Г., Язев С.А. // Солнечные данные. 1991. № 2. С. 78.
 Банин В.Г., Язев С.А., Хмыров Г.М. // Солнечные данные. 1991. № 3. С. 116.
 Ванг (Wang Y.-M.) // Space Sci. Rev. 2009. V. 144. P. 383.
 Зиркер (Zirker J. (Ed.)) // Coronal Holes and High-Speed Wind Streams. Colorado Associated University Press. Boulder. Colo. 1977.
 Маланушенко Е.В. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1995. Т. 89. С. 22.
 Руденко (Rudenko G.V.) // Solar Phys. 2001. V. 198. P. 5.
 Файнштейн В.Г., Степанян Н.Н., Руденко Г.В., Малащук В.М., Кашапова Л.К. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2010. Т. 106. № 1. С. 7.
 Файнштейн и др. (Fainshtein V.G., Stepanian N.N., Akhtemov Z.S., Rudenko G.V., Silakova E.V.) // Bull. Crim. Astrophys. Observ. 2011. V. 107. P. 51.