

УДК 523.98

## Магнитоизолированные комплексы солнечных образований в 24 цикле солнечной активности

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

<sup>1</sup>ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, Крым, 298409  
*mvm@crao.crimea.ru*

<sup>2</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН (ИСЗФ), а/я 291, Иркутск, Россия, 664033

Поступила в редакцию 13 ноября 2015 г.

**Аннотация.** На изображениях Солнца в линии HeI 1083 нм за период с 2012 г. по май 2015 г. были выделены 17 магнитоизолированных комплексов солнечных образований. Все они были отождествлены в короне на изображениях Солнца в линии Fe IX–X 17.1 нм. При отождествлении особое внимание обращалось на непрерывность границ комплексов. Анализ арочных структур в короне вблизи границ магнитоизолированных комплексов солнечных образований (внутри и вне комплексов) показал, что более 80 % арочных структур не пересекают границ комплексов, что подтверждает изолированность магнитного поля внутри комплекса от магнитного поля вне комплекса.

Сравнение расположения на синоптической карте долгоживущего комплекса по наблюдениям в линии 17.1 нм с крупномасштабным магнитным полем в той же области на высотах 1, 1.175 и 2.5 радиуса Солнца показало, что в начальной стадии развития комплекса крупномасштабное поле над ним имеет один знак. В дальнейшем в нем появляются вкрапления поля другого знака сначала на больших высотах, а затем и на более низких. Смена знака крупномасштабного поля над комплексом совпадает с развалом комплекса.

Внутри комплексов большого размера иногда наблюдаются меньшие комплексы. При этом малый комплекс магнитоизолирован от большого.

Время существования комплексов часто бывает более двух кэррингтоновских оборотов Солнца.

MAGNETIC ISOLATED COMPLEXES IN SOLAR ACTIVITY CYCLE 24, by *V.M. Malashchuk, V.G. Fainshtein, N.N. Stepanian, G.V. Rudenko*. 17 magnetically isolated complexes were allocated on the solar images in the HeI 1083 nm line over the period from 2012 to May 2015. All of them were identified in the corona on the solar images in the Fe IX–X 17.1 nm line. While being identified special attention was paid to the continuity of boundaries of the complex. The analysis of arch structures in the corona near the boundaries of the magnetically isolated complexes of solar formations (inside and outside the complexes) showed that more than 80 % of arch structures do not cross the boundaries of the complexes. This confirms the magnetic field isolation inside the complex from the outside magnetic field.

The comparison of location of the long-lived complexes on the map in the 17.1 nm line and the large-scale magnetic field at heights of 1, 1.175 and 2.5 solar radii showed that in the initial stage of development of the complex the large-scale field above it has the same sign. Later blotches of the field with opposite sign appeared, first at great heights, and then at lower ones. The full change of sign of the large-scale field above the complex coincides with collapse of the complex.

Sometimes we observed smaller complexes inside the large ones. The small complex was magnetically isolated from the large one.

The lifetime of complexes is often more than two Carrington solar rotations.

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

---

## 1 Введение

Магнитное поле в солнечной атмосфере весьма неоднородно. Особую роль в солнечных процессах играют специфические концентрации поля и плазмы – активные области (АО). Именно в АО чаще всего наблюдаются наиболее мощные проявления солнечной активности: вспышки, корональные выбросы массы и др. В свою очередь, АО могут объединяться в более крупные структуры – комплексы активности (КА). Комплексы активности – это крупномасштабные долгоживущие магнитные образования, представляющие собой физические системы из активных областей, одновременно и последовательно возникающих поблизости друг от друга (Язев, 2012).

Уже первые наблюдения КА позволили сделать вывод об их особой роли в солнечных процессах, что обусловило их интенсивное исследование в течение многих лет (Бэбкок и Бэбкок, 1955; Бумба, Говард, 1965а, б; Банин и др., 1991; Банин и Язев, 1991). Авторы этих работ показали, что развитие КА связано с активностью групп солнечных пятен. Важной особенностью КА является, как отметил Язев (2012), то, что “...многие важные свойства КА, включая их геоэффективность, отражают коллективное свойство этих систем и не могут быть выведены из свойств индивидуальных АО”.

В последние годы был сделан вывод, что на Солнце можно выделить крупномасштабные структуры, включающие в себя не только АО, но и другие солнечные образования. Такие структуры, как КА, играют самостоятельную роль и состоят из тесно связанных элементов. Так, в работах (Маланушенко, 1995; Малащук, Степанян, 2012; Малащук и др., 2012; Малащук, Степанян, 2013; Файнштейн и др., 2013) описаны структуры, которые, кроме АО и примыкающих к ним КД, включают еще один тип солнечных образований, которые авторы цитированных работ назвали “промежуточными областями” (ПО). По наблюдениям Солнца в линии HeI 10830 Å промежуточные области – это с особыми свойствами участки спокойных областей, примыкающие к КД. 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 ПО. Другими словами, контраст в них практически такой же, как в остальных участках спокойной области.

Предварительный анализ показал, что выделенные таким образом крупномасштабные структуры, состоящие из АО, КД и ПО, имеют слабую магнитную связь с окружающими областями. Другими словами, магнитный поток, выходящий из этих структур наружу, мал по сравнению с потоками поля внутри структур. Большинство силовых линий магнитного поля, начинающихся в таких структурах, оказываются либо открытыми, либо замкнутыми внутри них. Этот анализ проводился с использованием расчетов магнитного поля в потенциальном приближении с относительно невысоким пространственным разрешением, а количественно магнитный поток, выходящий из таких структур, оценивался довольно грубо. Тем не менее, проведенный анализ в первом приближении позволил считать такие структуры магнитоизолированными и ввести для них термин “магнитоизолированные комплексы солнечных образований”.

Магнитоизолированные комплексы солнечных образований...

Обридко и Шельтинг (2013) ввели понятие “глобальные комплексы активности” как структуры, включающие в себя АО и примыкающие к ним корональные дыры (КД). Авторы показали, что эволюция АО и КД является частью единого процесса.

## 2 Исходный материал и его обработка

В данной работе рассмотрены магнитоизолированные комплексы солнечных образований (далее “комплексы”), наблюдавшиеся в период с 2012 по 2015 гг. в линии HeI 1083 нм, отождествленные в короне по наблюдениям в линии 17.1 нм и сопоставленные с распределением крупномасштабного магнитного поля на высотах от фотосферы до поверхности источника.

**Таблица 1.** Список наблюдавшихся комплексов

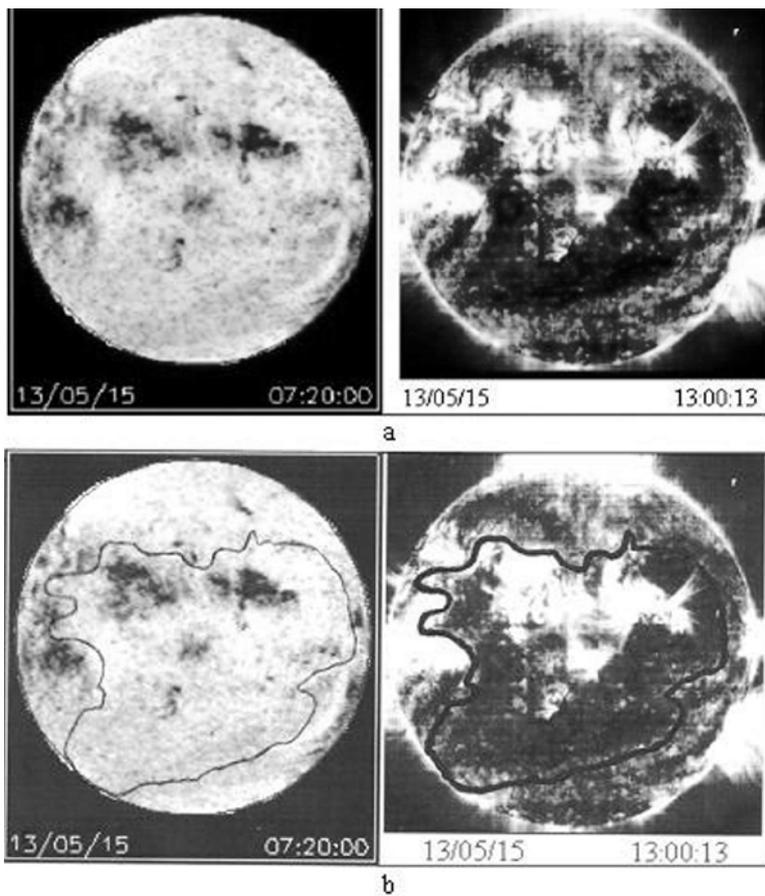
№ комплекса	Дата наблюдения комплекса	№ кэрринг-тоновского оборота	№ комплекса	Дата наблюдения комплекса	№ кэрринг-тоновского оборота	
1	11.11.2012	2130	10	09.07.2014	2152	
	12.11.2012	2130		10.07.2014	2152	
	13.11.2012	2130		11.07.2014	2152	
2	08.05.2013	2136	11	12.07.2014	2152	
	11.05.2013	2136		31.07.2014	2153	
3	06.06.2013	2137	12	01.08.2014	2153	
	07.06.2013	2137		02.08.2014	2153	
	10.06.2013	2137		26.08.2014	2154	
4	19.06.2013	2138	13	27.08.2014	2154	
	20.06.2013	2138		28.08.2014	2154	
	21.06.2013	2138		29.08.2014	2154	
	15.07.2013	2139		01.09.2014	2154	
5	16.07.2013	2139	14	02.09.2014	2154	
	17.07.2013	2139		03.09.2014	2154	
	18.07.2013	2139		04.09.2014	2154	
	19.07.2013	2139		05.09.2014	2154	
	20.07.2013	2139		06.09.2014	2154	
	11.10.2013	2142		15	24.03.2015	2161
	12.10.2013	2142		15	25.03.2015	2161
6	13.10.2013	2142	16	25.04.2015	2162	
	05.11.2013	2143		27.04.2015	2162	
7	06.11.2013	2143	17	05.05.2015	2163	
	30.04.2014	2149		06.05.2015	2163	
	02.05.2014	2149		07.05.2015	2163	
	03.05.2014	2149		12.05.2015	2163	
8	28.05.2014	2150	17	13.05.2015	2163	
	29.05.2014	2150		14.05.2015	2163	

Исходным материалом послужили:

- изображения Солнца в линии HeI 1083 нм, полученные с помощью Универсального спектрофотометра на телескопе БСТ-2 НИИ “КрАО”;
- изображения Солнца в линии Fe IX–X 17.1 нм, полученные на борту космического аппарата SOHO;

- синоптические карты радиальной компоненты магнитного поля Солнца, рассчитанные и построенные по фотосферным наблюдениям обсерватории SOLIS на высотах от фотосферы до поверхности источника с помощью методики Руденко (2001).

По материалам наблюдений с ноября 2012 г. до середины мая 2015 г. были выбраны 17 комплексов, наблюдавшихся от 2 до 6 дней в одном обороте Солнца в линиях HeI 1083 и Fe IX–X 17.1 нм. Несколько комплексов существовали в двух и более кэррингтоновских оборотах Солнца.



**Рис. 1.** (а) – магнитоизолированный комплекс № 17 от 13.05.2015 г. по наблюдениям в линии HeI 1083 нм (левый диск Солнца) и в линии 17.1 нм (правый диск). (б) – те же изображения с нанесенными границами комплекса

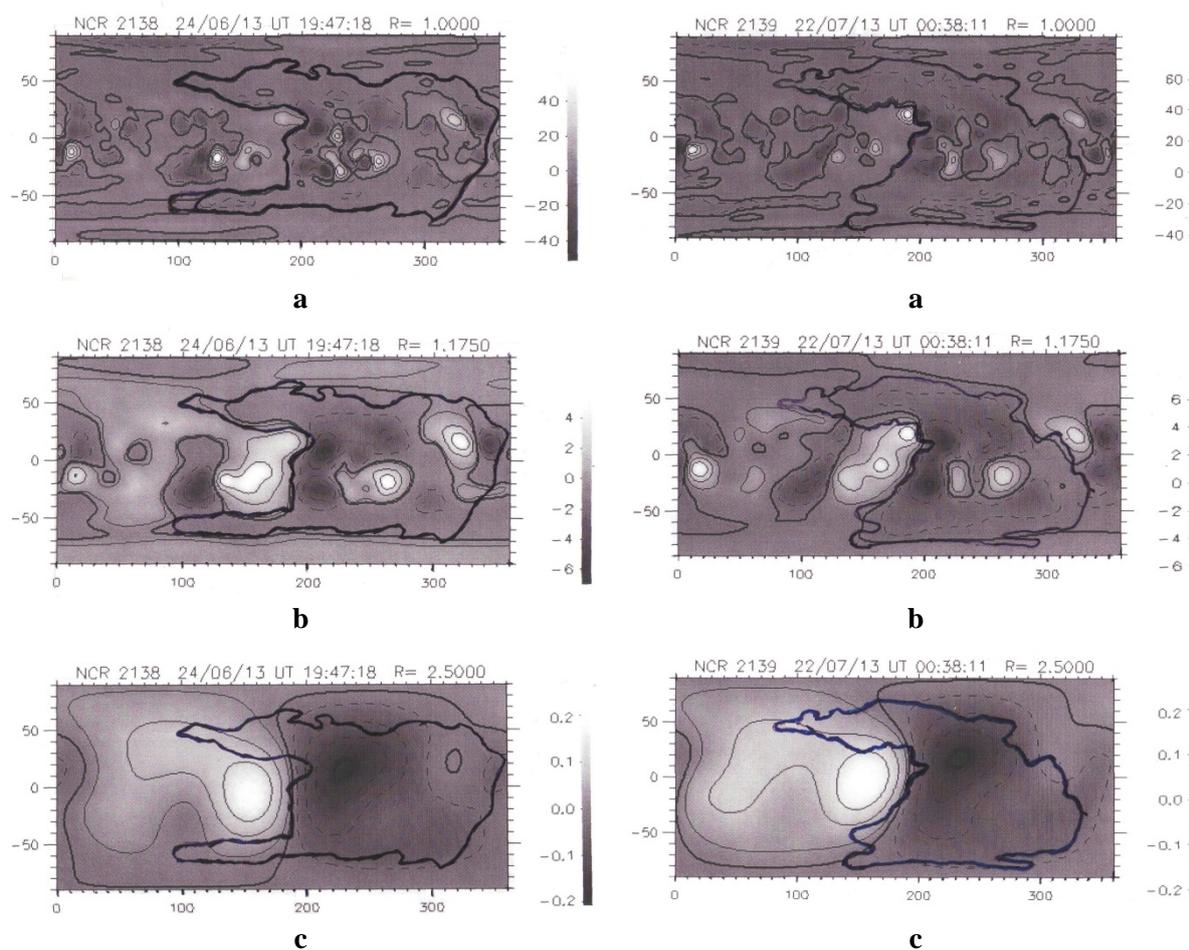
Всего использовано наблюдений, проведенных в течение 54 дней. На всех изображениях в обеих линиях границы комплексов отождествляются уверенно. При отождествлении обращалось внимание на непрерывность границ комплексов, состоящих из границ АО, волокон, границ корональных дыр (КД), промежуточных областей (ПО) между КД и невозмущенными областями. Границы комплексов видны как цепочки темных образований малого размера. Для сопоставления комплексов с распределением магнитного поля на разных высотах изображения Солнца в линии HeI 1083 нм и 17.1 нм представлялись в гелиографических координатах в том же масштабе, что и синоптические карты рассчитанного магнитного поля всего Солнца. В ста-

Магнитоизолированные комплексы солнечных образований...

ть рассмотрены магнитные поля на высотах 1, 1.175 и 2.5 радиуса Солнца. В таблице 1 приведены сведения обо всех наблюдаемых комплексах.

На рис. 1 приведен пример магнитоизолированного комплекса по наблюдениям в двух линиях без проведенных границ (а) и с нанесенными границами (б).

### 3 Результаты



**Рис. 2.** (а, б, с) Поле на трех высотах (1.0, 1.175 и 2.5  $R_{\odot}$ ) в КО 2138 и границы комплекса в линии HeI в том же обороте (жирная кривая)

**Рис. 3.** (а, б, с) То же, что и на рис. 2, для оборота КО 2139

#### 3.1 Оценка интенсивности магнитной связи комплексов с окружающими участками солнечной атмосферы по наблюдениям Солнца в линии 17.1 нм

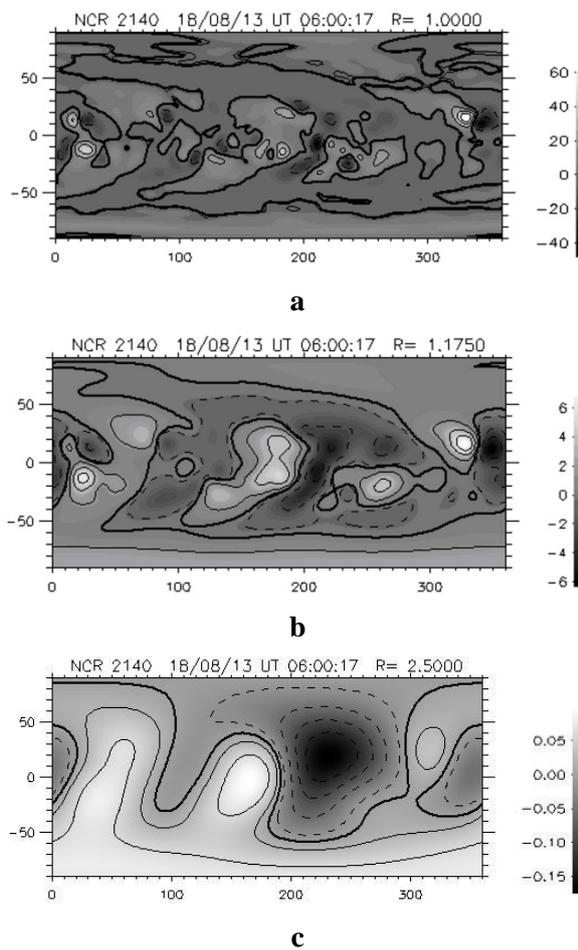
В качестве меры магнитной связи МИКСО с окружающими участками солнечной атмосферы мы использовали отношение числа арочных или петлеобразных структур, пересекающих границу рассматриваемых комплексов, к числу таких структур, один конец которых примыкает к границе снаружи и внутри комплекса.

Арочные структуры выделялись на изображениях Солнца в линии 17.1 нм.

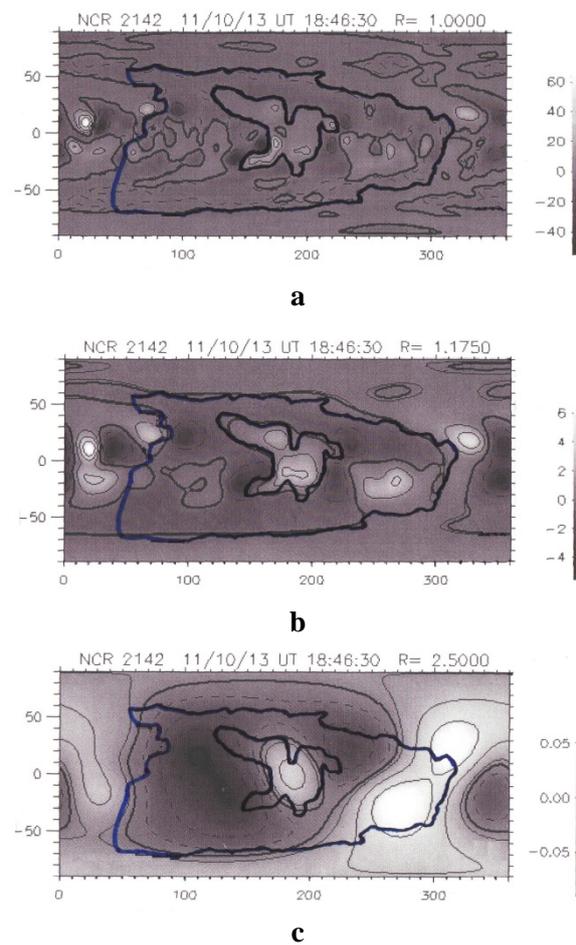
Был проведен подсчет арок внутри области, расположенной на расстоянии  $\pm 5^\circ$  от границы комплекса. В этом случае число арок, пересекающих границу, составляло  $0.225 \pm 0.017$  от числа арок, подходящих к границе изнутри комплекса и снаружи него, но не пересекающих границу.

### 3.2 Развитие долгоживущего комплекса и крупномасштабного поля над ним

Мы проследили эволюцию одного комплекса на протяжении 7 оборотов Солнца (кэррингтоновские обороты (КО) № 2138–2144, июнь–ноябрь 2013 г.) по наблюдениям в линии HeI и изменение магнитного поля Солнца на высотах 1–2.5  $R_\odot$  за это время.



**Рис. 4.** (а, b, с) Поле на трех высотах (1.0, 1.175 и 2.5  $R_\odot$ ) в КО 2140



**Рис. 5.** (а, b, с) То же, что и на рис. 2, для оборота КО 2142

Границы комплекса, полученные для каждого оборота в линии HeI, накладывались на синоптические карты радиальной компоненты магнитного поля Солнца, построенные для высот 1.0, 1.175 и 2.5  $R_\odot$  в тех же оборотах. Результаты такого наложения показаны на рис. 2, рис. 3, рис. 5 и рис. 6.

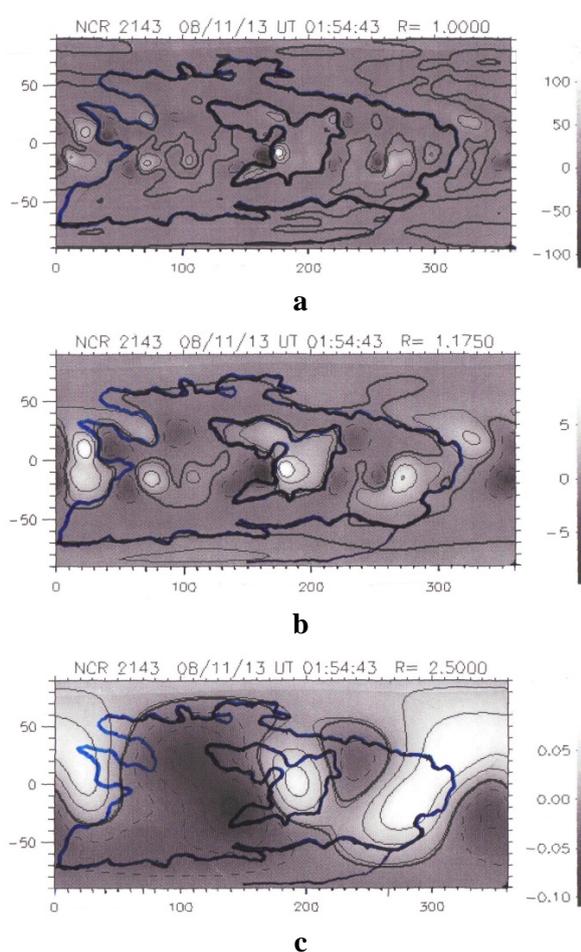
## Магнитоизолированные комплексы солнечных образований...

В июне и июле 2013 г. этот комплекс наблюдался на долготах от  $100^\circ$  до  $360^\circ$  и широтах от  $-60^\circ$  до  $+60^\circ$ . За первые два оборота (КО 2138 и КО 2139) по наблюдению в линии HeI комплекс мало изменился.

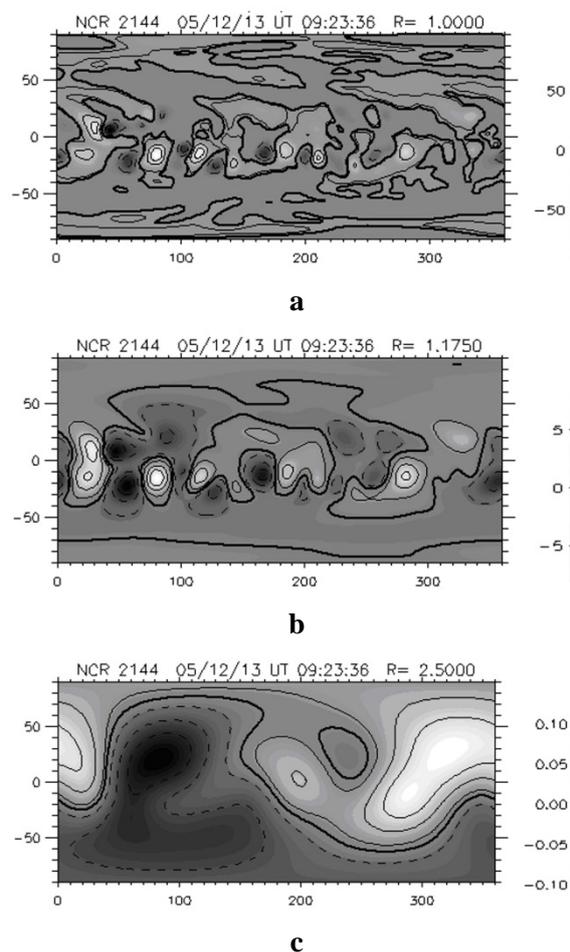
На картах поля для высот 1 и  $1.175 R_\odot$  в КО 2138 место расположения комплекса находится полностью в области “-” поля. На высоте  $2.5 R_\odot$  над северо-восточной частью комплекса расположено “+” поле (рис. 2). В следующем обороте Солнца форма комплекса в линии HeI изменилась. Исчезла его юго-восточная часть, что совпало с изменением знака поля в этой области на высотах  $1.175 R_\odot$  (рис. 3).

В оборотах КО 2140, КО 2141 идет разрушение комплекса. На синоптических картах в месте его бывшего расположения на всех высотах видно расширение областей “+” поля. Поле на трех высотах в обороте КО 2140 представлено на рис. 4.

В сентябре (КО 2141) комплекс полностью разрушился.



**Рис. 6.** (а, b, с) То же, что и на рис. 2, для оборота КО 2143



**Рис. 7.** (а, b, с) Поле на трех высотах ( $1.0$ ,  $1.175$  и  $2.5 R_\odot$ ) для оборота КО 2144

В октябре и ноябре (КО 2142 и КО 2143) комплекс восстановился на долготах от  $50^\circ$  до  $310^\circ$  и широтах от  $-70^\circ$  до  $+60^\circ$ . На синоптических картах на этом пространстве на высоте  $R_\odot$  снова “-” поле. Над западной частью комплекса на высотах  $1.175$ – $2.5 R_\odot$  возникла область “+” поля (рис. 5 и рис. 6).

В следующем обороте (КО 2144) комплекс разрушается. На высотах  $1.175 R_{\odot}$  и  $2.5 R_{\odot}$  положения областей “+” и “-” поля меняются по долготе.

Проследив по синоптическим картам на рис. 2 – рис. 7 изменение от оборота к обороту Солнца крупномасштабного поля на разных высотах, мы видим, что смена знака поля в месте расположения комплекса начинается с больших высот и через несколько оборотов знак поля меняется и на уровне фотосферы. К этому времени исчезает и сам комплекс. Создание впоследствии в этом месте на всех высотах большой области крупномасштабного поля преимущественно одного знака сопровождалось и восстановлением комплекса, видимого в линиях HeI и 17.1 нм.

То, что изменение знака крупномасштабного магнитного поля в области комплекса начинается с больших высот, видно и по другим комплексам с более коротким временем существования. В частности, комплексы 2 и 3 являются одним комплексом, существовавшим 2 оборота. Во втором обороте на высоте  $2.5 R_{\odot}$  магнитное поле почти над всем комплексом изменило знак с “-” на “+”. По материалам, рассмотренным в наших более ранних работах, было определено, что крупномасштабное магнитное поле внутри комплекса, вне активных областей, на уровне фотосферы преимущественно одного знака. Материалы 24 цикла подтвердили этот вывод. Анализ сравнения знака крупномасштабных полей на разных высотах над комплексами и положения комплексов по наблюдениям в линиях HeI и 17.1 нм привел нас к двум выводам:

- изменение структуры крупномасштабного поля в области расположения комплекса начинается с больших высот и распространяется вниз;
- существование крупной структуры магнитного поля преимущественно одного знака – необходимое условие существования комплекса.

### 3.3 Вложенные магнитоизолированные комплексы

В нашем исходном материале можно увидеть несколько случаев, когда внутри большого комплекса находится малый комплекс, преимущественный знак магнитного крупномасштабного поля в котором противоположен знаку поля в большом комплексе. Так, в центре рассмотренного выше долгоживущего комплекса находится область преимущественно положительного поля в КО 2142 и КО 2143. Эту область можно рассматривать как небольшой комплекс внутри большого. Отношение числа арочных структур, пересекающих границы малого комплекса, к числу арочных структур, расположенных внутри этого комплекса, равно  $0.216 \pm 0.003$  (КО 2142) и  $0.228 \pm 0.004$  (КО 2143).

## 4 Заключение

Сравнение магнитоизолированных комплексов, наблюдаемых на двух уровнях в атмосфере Солнца по изображениям в линиях 1083 нм и 17.1 нм, с крупномасштабным магнитным полем на разных высотах в атмосфере Солнца в месте образования комплекса и над ним привело к следующим результатам:

- Комплексы, обнаруженные первоначально в 22–23 циклах в верхней хромосфере на изображениях Солнца в линии HeI 1083 нм и отождествленные в короне на изображениях в линии Fe IX–X 17.1 нм, уверенно наблюдаются и в 24 цикле. Проведено независимое определение границ в этих двух линиях для 17 комплексов в течение 54 дней.
- Подсчет арок на близких расстояниях от границ комплексов в полосе  $\pm 5^\circ$  от них показал, что только 20 % наблюдаемых там арок пересекают границу. 80 % примыкают к границе по ту или другую сторону от нее. Существенно, что этот вывод получен по

наблюдениям корональных арок, трассирующих магнитные силовые линии, а не по расчетам арочных структур.

- Сравнение расположения на синоптической карте долгоживущего комплекса по наблюдениям в линии 17.1 нм с крупномасштабным магнитным полем в той же области на высотах 1, 1.175 и 2.5 радиуса Солнца показало, что в начальной стадии развития комплекса крупномасштабное поле над ним имеет один знак (за исключением активных областей). В последующих оборотах Солнца в крупномасштабном поле появляются вкрапления поля другого знака сначала на больших высотах, а затем и на более низких. Через два-три оборота поле над комплексом полностью меняет знак. К этому времени распадается и сам комплекс. Мы считаем, что причина развала комплекса – выход в область существования комплекса крупной структуры магнитного поля противоположного знака, распространяющейся вниз из верхних областей атмосферы Солнца.
- Внутри некоторых комплексов большого размера иногда находились небольшие комплексы. При этом наблюдалась магнитоизолированность малого комплекса от большого.

## Литература

- Банин В.Г., Язев С.А. // Бюлл. Солнечные данные. 1991. № 2. С. 78.
- Банин В.Г., Язев С.А., Хмыров Г.М. // Бюлл. Солнечные данные. 1991. № 3. С. 116.
- Бэбкок и Бэбкок (Babcock H.W. and Babcock H.D.) // *Astrophys. J.* 1955. 121. P. 349.
- Бумба и Говард (Bumba V. and Howard R.) // *Astrophys. J.* 1965a. V. 141. P. 1492.
- Бумба и Говард (Bumba V. and Howard R.) // *Astrophys. J.* 1965b. V. 141. P. 1502.
- Маланушенко Е.В. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1995. Т. 89. С. 22.
- Малашук В.М., Степанян Н.Н. // Международная конференция “Астрономія та фізика космосу в Київському університеті в рамках VI Всеукраїнського фестивалю науки”, посвященная памяти А.В. Манджоса. Сб. тез.: Киев. 2012. С. 67.
- Малашук В.М., Файнштейн В.Г., Степанян Н.Н., Руденко Г.В., Егоров Я.И. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2012. Т. 108. № 1. С. 105.
- Малашук, Степанян (Malashchuk V.M., Stepanian N.N.) // *Bull. Crim. Astrophys. Obs.* 2013. V. 109. N. 1. P. 98.
- Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д. // *Астрон. журн.* 2013. Т. 90. № 10. С. 857.
- Руденко (Rudenko G.V.) // *Solar Phys.* 2001. V. 198. P. 5.
- Файнштейн и др. (Fainshtein V.G., Malashchuk V.M., Stepanian N.N., et al.) // *Bull. Crim. Astrophys. Obs.* 2013. V. 109. N. 1. P. 104.
- Язев С.А. // Феномен комплексов активности на Солнце. Диссертация на соискание степени доктора физ.-мат. наук. 2012.