

УДК 523.945

## Связь движения вещества в корональных дырах с их эволюцией

*Р.К. Жигалкин, В.М. Малащук, Н.Н. Степанян*

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный  
e-mail: nataly@crao.crimea.ua

Поступила в редакцию 6 февраля 2008 г.

**Аннотация.** Рассмотрена эволюция долгоживущей корональной дыры (КД) с февраля по август 2002 г. в области  $\varphi = -20^\circ \div +15^\circ$ ,  $L = 30^\circ \div 35^\circ$ . На протяжении всей жизни в ней несколько раз возникали активные образования. После их исчезновения КД восстанавливалась в прежнем виде.

Подробно рассмотрен каррингтоновский оборот R1989 с 12 по 26 мая 2002 г. Для этого оборота по наблюдениям в линии HeI 1083 нм определены относительные площади КД. По наблюдениям в линии NiI 676.8 нм (КА SOHO, прибор MDI) найдены периоды изменения лучевых скоростей. Изменение этих периодов в КД качественно сопоставлено с изменением площадей КД. Получено, что периоды колебаний в фотосферных слоях КД линейно связаны с площадями КД в хромосфере.

Для интервала наблюдений с 12 по 26 мая 2002 г. выделено 52 участка в корональных дырах, для которых оценены изменения площадей в линии HeI 1083 нм. Для моментов, близких к наблюдениям в HeI 1083 нм, были найдены средние скорости вертикального движения вещества по данным MDI. Получено, что рост КД сопровождается подъемом вещества на уровне фотосферы, а ее распад – опусканием.

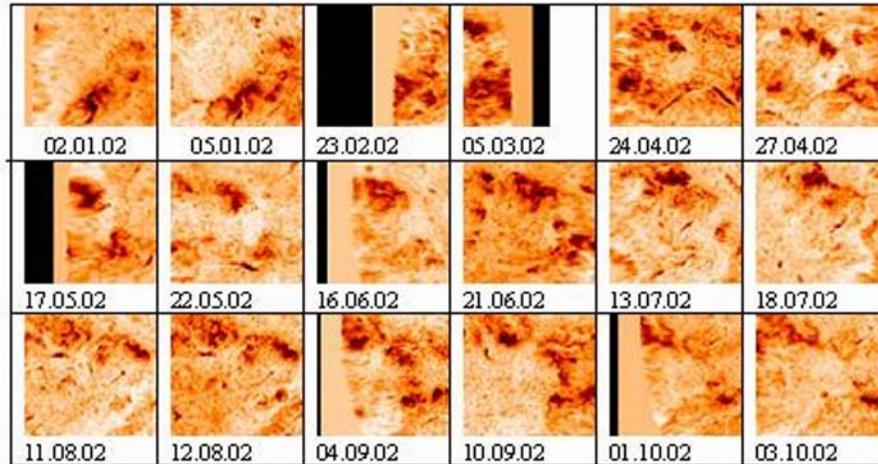
RELATION BETWEEN MOTION OF MATTER IN CORONAL HOLES AND THEIR EVOLUTION, *by R.K. Zhigalkin, V.M. Malashchuk, N.N. Stepanian*. We consider the evolution of a long-lived coronal hole (CH) from February to August 2002 in the range  $\varphi = -20^\circ \div +15^\circ$ ,  $L = 30^\circ \div 35^\circ$ . Active formations occurred several times in it over its lifetime. After their extinction CH restored as it was before.

The Carrington rotation R1989 on May 12–26, 2002 has been studied in detail. For this rotation the relative CH areas on the basis of observations in the HeI 1083 nm line were determined. As a result of observations in the NiI 676.8 nm line (SOHO, MDI) the periods of the line-of-sight velocity variations have been detected. Variations of these periods in CH were compared with variations of CH areas. It appears that oscillation periods in photospheric layers of CH are connected linearly with CH areas in the chromosphere.

For the observation interval May 12–26, 2002 we distinguished 52 sites in coronal holes for which estimated area variations in the HeI 1083 nm line. For the moments similar to observations in the HeI 1083 nm line an average speed of vertical motion of matter on MDI data was detected. It was obtained that the growth of CH is accompanied by upward motion of matter at the photospheric level, and its decay – by downward motion.

**Ключевые слова:** Солнце, корональные дыры, движения

---



**Рис. 1.** Вид корональной дыры (светлые области) с января по октябрь 2002 г. в гелиографических координатах

## 1 Введение

Мы продолжаем серию работ, посвященных разным аспектам эволюции корональных дыр и их связям с окружающими солнечными образованиями. В нашей “коллекции” есть корональная дыра (КД), эволюцию которой мы просмотрели на протяжении нескольких лет (Степанян, Штерцер, 2002). Рассматривалась эволюция КД на разных высотах в атмосфере Солнца (Степанян, Малащук, 2002), связь КД с магнитными полями (Степанян, 1997; Степанян, Маланушенко, 2001; Жигалкин и др., 2005) и солнечными вспышками (Маланушенко, Степанян, 2001а). Исследования колебательных процессов в КД начаты в работе (Маланушенко и др., 1995) и продолжены Жигалкиным (2007).

Все эти работы выполнены на основе крымских наблюдений Солнца в линии HeI 1083 нм на телескопе БСТ-2 с Универсальным спектрофотометром (Степанян и др., 2000) с привлечением широкого круга наземных и космических наблюдений других авторов.

В настоящей работе кратко рассмотрена эволюция КД ( $\varphi = -20^\circ \div +15^\circ$ ,  $L = 30^\circ \div 35^\circ$ ) в течение всего времени ее существования. Для одного каррингтоновского оборота подробно исследованы вертикальные движения в области КД на уровне фотосферы, их связь с другими изменениями, происходившими в это время. Кроме того, для всех КД, наблюдавшихся в этом обороте, оценена связь вертикальных движений с изменением площадей КД.

## 2 Эволюция корональной дыры $\varphi = -20^\circ \div +15^\circ$ , $L = 30^\circ \div 30^\circ$

В начале января 2002 года в области  $\varphi = -20^\circ \div +15^\circ$ ,  $L = 30^\circ \div 35^\circ$  наблюдалась активная область, с востока от которой была видна небольшая КД. За три дня активная область и КД стремительно выросли. Площадь КД постепенно увеличивалась, и к концу апреля она охватывала активную область с трех сторон и практически состояла из трех КД. Такая структура в среднем сохранялась до конца июля 2002 г. За это время относительная яркость трех составляющих КД (а иногда и четырех) заметно менялась. Кроме того, несколько раз внутри КД возникали активные области. После их исчезновения КД восстанавливалась в прежнем виде. Даже возникновение мощной активной области во второй половине июня, оставив узкий канал КД, не изменило ее восточной границы. (рис. 1).

Обратимся к более подробному рассмотрению поведения этой КД в течение каррингтоновского оборота R1989 с 16 по 26 мая 2002 г. Изображения КД в линии HeI за все дни наблюдений с 16 по 27

мая 2002 г. представлены на рис. 2 в гелиографических координатах. При анализе использовались также наблюдения на SOHO в корональной линии 171 Å.

Протяженная по меридиану КД со значительной частью на севере и юге от активного комплекса во время прохождения по диску превращается в 4 отдельные КД. На рис. 2 они отмечены прямоугольниками на изображении 22.05.02.

Характер границ КД (по измерениям яркости) за все время ее существования мало изменялся. Границы с активными областями на востоке и юго-западе – резкие. В остальных частях граница проходит между отдельными узлами флоккулов и спокойными участками.

Рассмотрим относительное изменение площадей этих четырех КД.

Как и в прошлых наших работах (Степанян, Маланушенко, 2001), площадь КД – это сумма площадей участков, имеющих интенсивность  $I > 1.01 \times I_0$ , где  $I_0$  – интенсивность невозмущенного диска. Площади считаются внутри выделенного большого участка, заведомо включающего данную КД.

Изменения площади рассматриваемых КД происходят не за счет изменения внешних границ КД, а за счет увеличения или уменьшения числа вкраплений флоккульных элементов внутри границ КД. Этот процесс протекает по-разному в каждой из четырех КД. На рис. 3 представлено относительное изменение площадей четырех КД. Максимальная за время наблюдения площадь каждой КД принята за 3.

Наиболее яркой и стабильной была КД1. С 16 по 20 мая яркость и площадь в ней уменьшались, а затем снова увеличились. В первые дни наблюдений эта КД постепенно “охватила” область нескольких флоккульных элементов (а возможно, и пор) на западной границе активной области. К 27 мая эти элементы исчезли.

КД2 меньше по площади, чем КД1. Площадь ее падала с 16 до 20 мая. После двух дней малой площади она вновь стала больше. В это время в ней возник компактный темный узел.

КД3, выйдя из-за лимба яркой и большой по площади, к 22 мая фактически перестала быть КД, но с 23 мая вновь появлялась.

В области КД4 до 20 мая наблюдалось лишь несколько отдельных узлов с яркостью КД. После этого площадь КД4 стала быстро расти.

Из этого описания и графиков на рис. 3 видно, что после синхронного уменьшения площадей в первые два дня наблюдений дальнейшие изменения площадей происходили асинхронно.

На уровне хромосферы (наблюдения в HeI) и короны (наблюдения в линии 171 Å) изменения КД также асинхронны. Участки КД, ставшие отдельными КД, были то открытыми, то закрывались. Об этом свидетельствует изменение соотношения между площадями КД в HeI и в линии 171 Å. Выходы новых магнитных потоков, видимые в линии HeI в виде темных компактных объектов, появляются только в хромосфере и живут не более суток.

Таким образом, мы видим, что в границах одной КД, мало меняющейся на протяжении шести месяцев, эволюция отдельных частей КД, их связь с магнитными полями и высотная стратификация существенно отличаются.

Перейдем к анализу вертикальных движений вещества под КД.

### 3 Метод исследования лучевых скоростей

Для исследования лучевых скоростей в описанных выше КД использовались наблюдения Солнца в линии Ni I 6768 Å с прибором Michelson Doppler Imager, установленным на КА SOHO (далее данные MDI) (Шеррер, 1997).

В данных MDI было учтено вращение Солнца по методике, описанной в (Говард, Харви, 1970) и использованной одним из авторов этой статьи в (Жигалкин, 2007). Пример изображений MDI до и после учета вращения Солнца дан на рис. 4. Далее изображения Солнца в MDI и HeI были приведены к одному масштабу и совмещались по наиболее четким деталям (крупным пятнам с большой скоростью опускания вещества). Был использован пакет программ, разработанных в (Степанян и др., 2000). Таким образом, мы получили возможность по наблюдениям в HeI выделить области КД на изображениях Солнца в MDI.

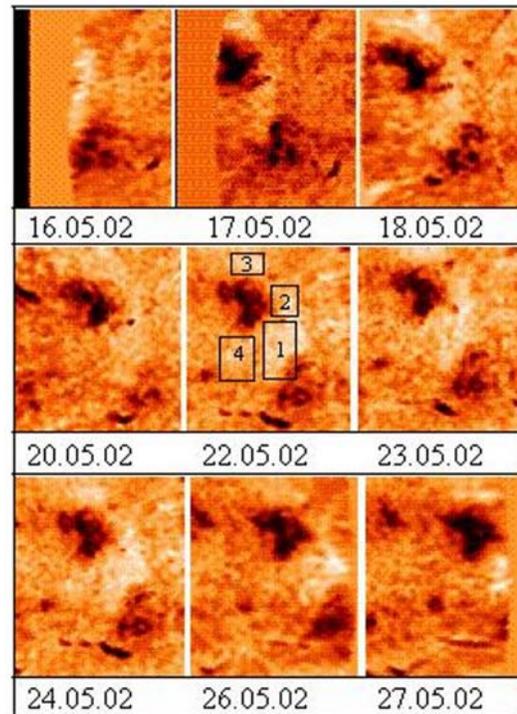


Рис. 2. Изображения исследуемой корональной дыры в линии HeI в гелиографических координатах с 16 по 27 мая 2002 г.

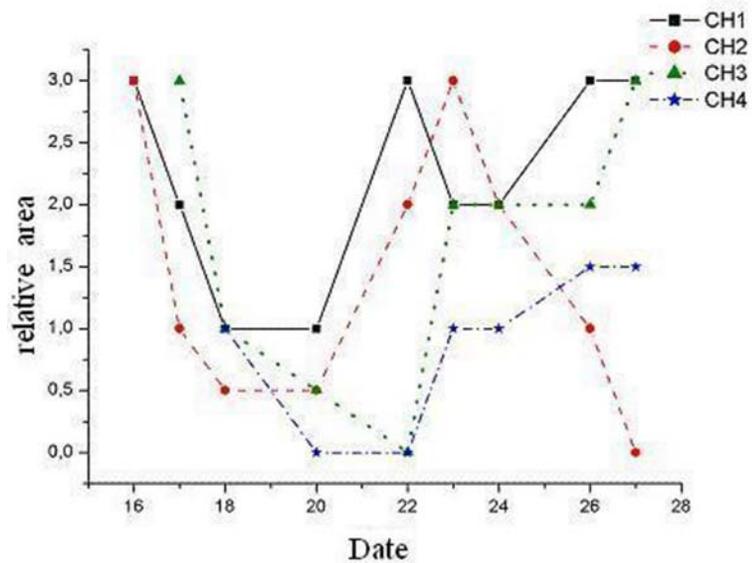


Рис. 3. Относительные изменения площадей четырех КД с 16 по 27 мая 2002 г.

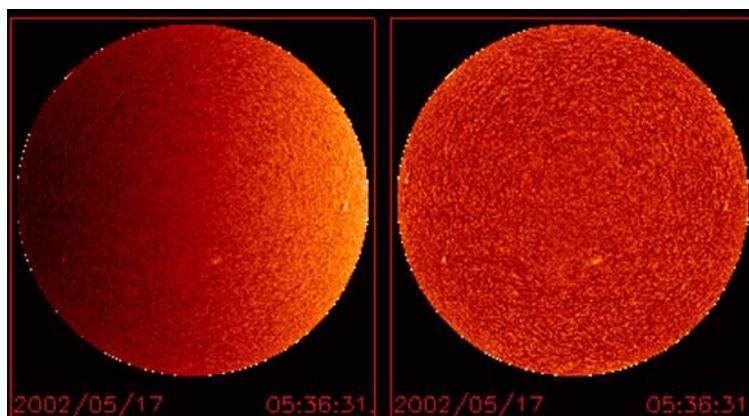


Рис. 4. Пример карты лучевых скоростей без учета (слева) и с учетом (справа) вращения Солнца

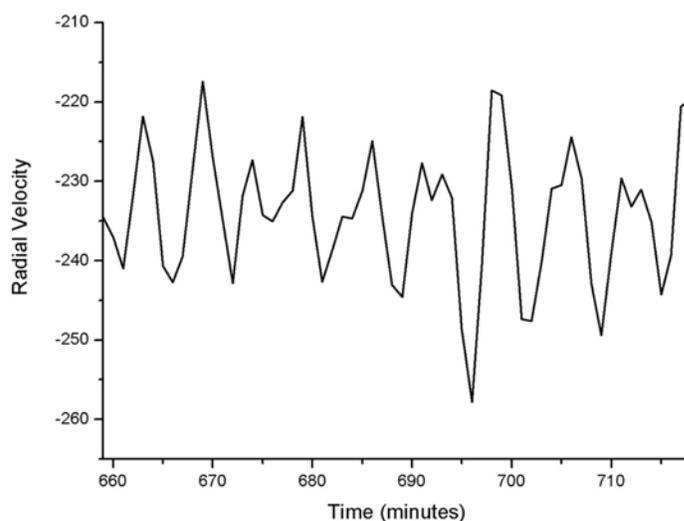


Рис. 5. Пример полученного временного ряда изменения лучевой скорости в м/с для КД4 22.05.2002 г.

#### 4 Построение рядов изменения лучевой скорости со временем

Изменения лучевой скорости рассматривались для четырех выделенных площадок внутри КД, отмеченных на рис. 2 на изображении 22.05.02. Для каждого дня наблюдений с 17.05.2002 по 24.05.2002 из данных MDI выбирался один час, ближайший к наблюдениям в линии HeI. Временные ряды лучевой скорости за этот час усреднялись для каждой из рассматриваемых площадок. Ошибка измерения лучевой скорости с прибором MDI составляет 20 м/с (Шеррер, 1997). При усреднении она уменьшается обратно пропорционально квадратному корню количества усредняемых измерений. Пример такого ряда дан на рис. 5.

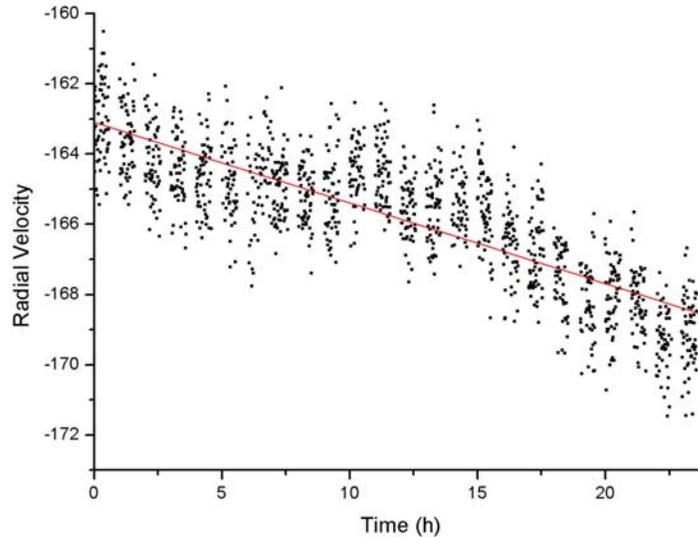


Рис. 6. Усредненные значения лучевой скорости по полному диску Солнца за 17.05.2002 г.

## 5 Среднее значение лучевой скорости по полному диску Солнца и определение “нуль-пункта”

После учета вращения в данных MDI средняя скорость для каждого диска не равна 0, так как при обработке не проводился учет движения Земли и спутника. Для нахождения “нуль-пункта”, по которому можно определять подъем-опускание вещества, были построены временные ряды средней по полному диску лучевой скорости за каждый день наблюдения Солнца. На рис. 6 приведен такой временной ряд для 17.05.02 г. Каждая точка представляет среднюю по диску скорость с осреднением по времени в 1 минуту. Из рис. 6 видно, что средняя лучевая скорость в течение суток меняется всего на 6 м/с, а за период с 6:00–7:00 UT, когда проводились наблюдения в линии HeI, она практически не изменилась. Поэтому среднее значение лучевой скорости по полному диску Солнца в момент, близкий к наблюдениям в HeI, можно принять за “нуль-пункт” отсчета скоростей.

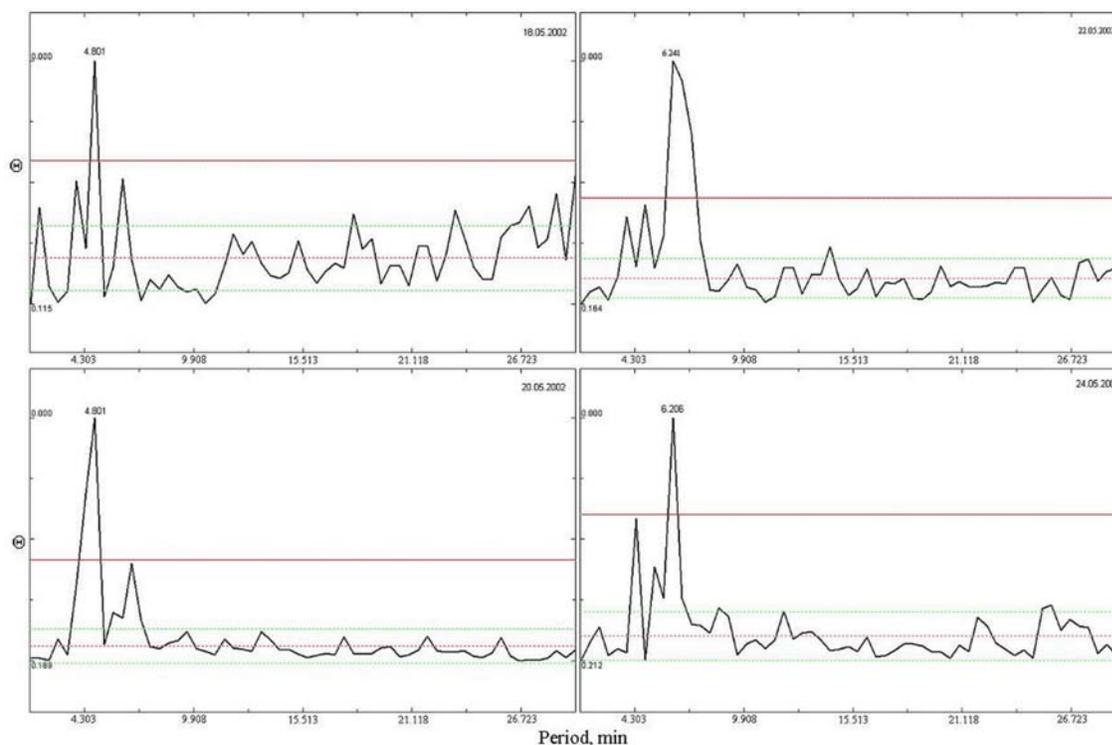
Аналогично для всех дней наблюдений за нуль-пункт принималось среднее значение лучевой скорости по полному диску Солнца за часовой интервал времени, ближайший к моменту наблюдений в HeI.

## 6 Частотный анализ временных рядов

Для частотного анализа временных рядов была использована программа “Анализ переменности звезд” (AVE, 2006), протестированная на временных рядах с заранее известными периодами. Отклонение от известных периодов составляло  $\sim 5-6\%$ .

Для построения спектров мощности и определения периодов колебаний был применен PDM-метод Стеллингверфа (1978). Этот метод частотного анализа был выбран потому, что он дает хорошие результаты при разрывных данных и относительно малом числе измерений.

Были построены спектры мощности в интервале периодов 3–30 минут для рассматриваемых четырех КД за период с 17.05.2002 по 24.05.2002. В качестве примера на рис. 7 представлены спектры мощности для КД4 за 4 дня. На каждом спектре только для одного периода мощность превышает уровень  $3\sigma$ .



**Рис. 7.** Спектры мощности для КД4 за 4 дня. Горизонтальная линия – уровень  $3\sigma$

Изменения периодов со временем для четырех КД представлены на рис. 8. Как видно из этих графиков, значения периодов колебаний лучевых скоростей для рассматриваемых КД лежат в интервале 4.4–6.2 мин.

Для тех же дней наблюдений были выбраны площадки в невозмущенных областях и в активных областях. Периоды колебаний в невозмущенных областях в среднем равны 5.2 мин, а в активных областях – около 5.7 мин.

Изменения периодов колебаний со временем в КД были качественно сопоставлены с изменением их площади. Были найдены средние для четырех КД изменения площади со временем (среднее из графиков рис. 4) и средние изменения периодов из графиков рис. 8. Аппроксимируя связь этих кривых линейной зависимостью, получаем выражение:

$$P = 4.85(\pm 0.08) + 0.36(\pm 0.05)S,$$

где  $P$  – период в минутах, а  $S$  – площадь КД в принятых нами относительных единицах.

Коэффициент корреляции двух кривых  $R = 0.95((\pm 0.07))$ .

Не следует серьезно относиться к этому результату из-за усреднения малого количества данных и существования большого количества неучтенных факторов (динамика процессов, высотная стратификация, магнитные поля и другие неизвестные факторы).

## 7 Крупномасштабные движения вещества в корональных дырах

Для областей с повышенной яркостью в HeI ( $I > 1.01$ ), характерной для КД, было прослежено изменение ото дня ко дню их площади и средней скорости по лучу зрения.

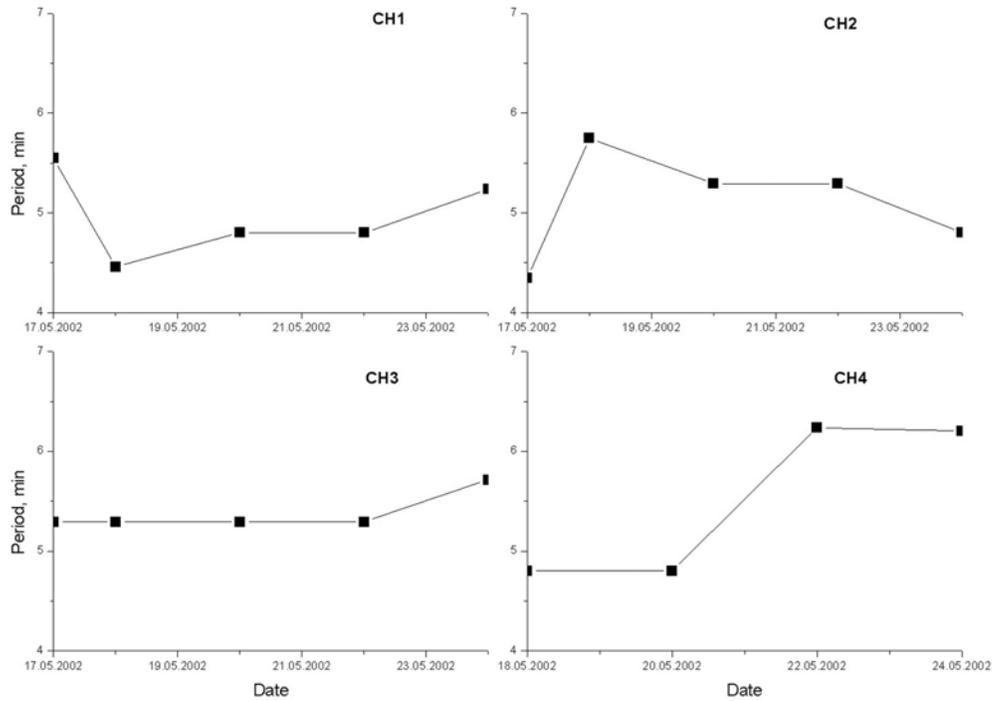


Рис. 8. Изменение периодов колебаний лучевой скорости со временем для четырех корональных дыр

Для периода с 12 по 26 мая 2002 г. было выделено 52 участка в корональных дырах, для которых были оценены площади в линии HeI и найдены средние скорости вертикального движения вещества по данным MDI в моменты, близкие к наблюдениям в HeI.

Поскольку 52 случая для статистического исследования – это слишком мало, изменения площади КД квалифицировались по трем классам: 1 – рост, 2 – стабильность и 3 – уменьшение площади. Движение вещества на уровне фотосферы рассматривалось также в виде трех классов: подъем ( $V < 0$ ),  $V = 0$  и опускание ( $V > 0$ ).

Результат представлен в виде таблицы.

Таблица 1. Связь средней лучевой скорости вещества в корональных дырах с изменением их площади

Скорость вещества	Изменение площади		
	рост	стабильность	уменьшение
$V = 0$	0	3	4
$V < 0$ (подъем)	18	6	1
$V > 0$ (опускание)	0	11	9

Отсюда можно сделать вывод: рост КД сопровождается подъемом вещества, а ее распад – опусканием.

## 8 Заключение

Проследив эволюцию долгоживущей КД мы еще раз убедились, что “нерушимость” границ КД и слабая связь магнитных полей внутри КД со внешними магнитными полями – характерные черты больших КД.

Но это не значит, что КД – застывшее образование. В более коротких временных масштабах за время прохождения по диску Солнца изменения внутри КД могут быть очень существенными. На примере изученной в данной работе КД мы видим, что, оставаясь в неизменных внешних границах, КД превращается в 4 отдельные КД, развивающиеся независимо. В них по-разному меняется площадь элементов с яркостью, характерной для КД, различается высотная стратификация. Последнее видно из различий в поведении КД по наблюдениям в  $\text{HeI}$  и в корональных линиях.

При изучении лучевых скоростей в области КД мы получили, что рост КД сопровождается подъемом вещества на уровне фотосферы, а ее распад – опусканием.

С некоторой долей уверенности можно утверждать, что периоды колебаний в фотосферных слоях КД линейно связаны с площадями КД в хромосфере.

Наличие связи движений в фотосфере с характеристиками КД в хромосфере свидетельствует о подфотосферных истоках корональных дыр. Свидетельства этого были получены ранее из исследования связи корональных дыр с фоновыми магнитными полями и их дифференциального вращения (Степанян, 1993; Зельк и др., 2004).

## Литература

- Анализ переменности звезд (AVE, Analisis de Variabilidad Estelar, stands for Analysis of Estellar Variability) // <http://www.astrogea.org/>.
- Говард, Харви (Howard R., Harvey J.W.) // Solar Phys. 1970. V. 12. P. 23.
- Жигалкин Р.К. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2007. Т. 104. ( в печати).
- Жигалкин Р.К., Кузин С.В., Файнштейн В.Г., Руденко Г.В., Малащук В.М., Перебейнос В.А., Степанян Н.Н., Штерцер Н.И. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2005. Т. 101. С. 128.
- Зельк Я.И., Андреева О.А., Степанян Н.Н. // Космическая наука и технология. 2004. №. 5.
- Маланушенко Е.В., Маланушенко В.П., Степанян Н.Н. // Изв. РАН. Серия физическая. 1995. Т. 59. №. 9. 38.
- Маланушенко Е.В., Степанян Н.Н // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2001. Т. 97. С. 69.
- Степанян Н.Н. // РАН-ФТИ. Солнечный цикл. 1993. С. 44.
- Стеллингверф (Stellingwerf R.F) // Astrophysical Journal. 1978. Part 1. V. 224. P. 953.
- Степанян Н.Н., Долгополова Е.В., Елизаров А.И. и др. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2000. Т. 96. С. 194.
- Степанян Н.Н., Маланушенко Е.В. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2001. Т. 97. С. 76.
- Степанян Н.Н., Малащук В.М. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2002. Т. 98. С. 8.
- Степанян Н.Н., Штерцер Н.И. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2002. Т. 98(2). С. 218.
- Шеррер и др. (Scherrer P.H. et al.) // The SOHO Mission. 1997. P. 129.