

УДК 523.945

## Исследование солнечных образований на основе комплексных наблюдений с Земли и на спутнике КОРОНАС-Ф:

### IV. Корональные дыры, открытые магнитные трубки и их связь с высокоскоростными потоками солнечного ветра

*И.А. Житник<sup>1</sup>, Р.К. Жигалкин<sup>3</sup>, А.П. Игнатьев<sup>1</sup>, С.В. Кузин<sup>1</sup>, В.М. Малащук<sup>3</sup>,  
В.А. Перебийнос<sup>3</sup>, А.А. Перцов<sup>4</sup>, Г.В. Руденко<sup>2</sup>, Н.Н. Степанян<sup>3</sup>, В.Г. Файнштейн<sup>2</sup>,  
Н.И. Штерцер<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> ФИАН, 53, Ленинский пр-т, Москва, 119991, Российская Федерация, e-mail: kuzin@mail1.lebedev.ru

<sup>2</sup> ИСЗФ СО РАН, 126 ул. Лермонтова, Иркутск 664033, e-mail: rud@iszf.irk.ru

<sup>3</sup> НИИ КраО, Научный, АР Крым, Украина, 98409, e-mail: nataly@crao.crimea.ua

Поступила в редакцию 29 декабря 2004 г.

#### Аннотация.

В настоящей работе исследуется связь двух классов корональных дыр (КД), регистрируемых в различных линиях солнечного излучения, с открытыми магнитными трубками (ОМТ), полученными из расчетов поля в короне в потенциальном приближении, а также с квазистационарными высоко-скоростными потоками (ВСП) солнечного ветра на орбите Земли. К первому классу относятся КД, площадь которых не меняется или возрастает с высотой (“открытые” КД), ко второму классу относятся дыры, площадь которых уменьшается с высотой (“замкнутые” КД). Показано, что большая часть “открытых” КД связана с ОМТ и ВСП, а большая часть “замкнутых” КД не связана с открытыми магнитными трубками и быстрыми потоками солнечного ветра.

STUDY OF SOLAR FEATURES BASED ON COMBINED GROUND-BASE AND CORONAS-F OBSERVATIONS. IV. CORONAL HOLES, OPEN MAGNETIC TUBES AND HIGH VELOCITY FLOWS OF SOLAR WIND, by I.A. Zhitnik, R.K. Zhygalkin, A.P. Ignatiev, S.V. Kuzin, V.M. Malashchuk, V.A. Perebeynos, A.A. Pertsov, G.V. Rudenko, N.N. Stepanian, V.G. Fainshtein, N.I. Shtertser. In the present work is researched the relation of two classes of coronal holes (CH) observed in various lines of solar emission with open magnetic tubes (OMT) obtained from the calculations of the field in corona in potential approximation, and also with quasistationary high velocity flows (HVF) of solar wind at the Earth's orbit. To the first class are taken the CH, which area doesn't change or it increases with the height (“open” CH), to the second class are taken the holes, which area decreases with the height (“closed” CH). It is shown that the largest part of “open” CH is associated with OMT and HVF and the largest part of “closed” CH is not associated with the open magnetic tubes and fast solar wind fluxes.

**Ключевые слова:** Солнце, корональные дыры, магнитные поля, солнечный ветер

---

## 1 Введение

Данная работа является продолжением серии из трех работ “Исследование солнечных образований на основе комплексных наблюдений с Земли и на спутнике КОРОНАС-Ф” (Бугаенко и др., 2004; Бугаенко и др., 2004а; Бугаенко и др., 2004б).

В четвертой работе этой серии мы рассматриваем вопрос о связи корональных дыр (КД) с открытыми магнитными трубками в короне (ОМТ) и высокоскоростными потоками (ВСП) солнечно-го ветра (СВ) на орбите Земли.

Корональные дыры (КД) – это крупномасштабные области солнечной атмосферы с пониженной плотностью вещества и температуры. КД регистрируются как участки короны с пониженной эмиссией в мягком рентгене и одновременно проявляются в различных линиях излучения из других слоев солнечной атмосферы (например, как места с более низкой эмиссией в линиях крайнего ультрафиолета и как более яркие участки в инфракрасном излучении в линии  $\text{HeI } 10830\text{\AA}$ ). В последнем случае область корональной дыры характеризуется также исчезновением или размытием хромосферной сетки) (Зиркер, 1977; Зирин, 1988).

Считается, что КД – это области с преимущественно открытой конфигурацией силовых линий магнитного поля. Из-за отсутствия прямых измерений магнитного поля в КД вывод о конфигурации поля в них можно сделать лишь на основании косвенных свидетельств. Для доказательства того, что силовые линии магнитного поля в КД являются преимущественно “открытыми”, т.е. они начинаются на поверхности Солнца и вытягиваются в межпланетное пространство, обычно используют следующие аргументы:

- внутри КД, наблюдаемых над солнечным лимбом (например, в полярных КД), отчетливо видны расходящиеся, удаляющиеся от поверхности Солнца на большие расстояния и почти радиальные на этих расстояниях эмиссионные структуры (в полярных КД это полярные щеточки), которые рассматриваются как трассеры силовых линий поля (Болин, Шилли, 1978);
- результаты экстраполяции фотосферного поля в корону с помощью, например, расчетов в рамках модели “потенциальное поле – поверхность источника”. Такие расчеты показывают, что в короне формируются открытые магнитные трубки, суммарная площадь оснований которых, как и суммарная площадь КД, существенно меньше площади поверхности Солнца, а основания многих отдельных магнитных трубок удовлетворительно совпадают с КД. Степень согласия таких структур зависит от различных факторов: типа расчетов, пространственного разрешения, с которым измеряется магнитное поле, фазы солнечной активности и др. (Пнейман и др., 1978; Левин, 1982; Еселевич и др., 1990);
- модельные расчеты КД (Суес и др., 1977), в которых быстрые потоки солнечного ветра (СВ), источниками которых согласно наблюдениям являются КД (Нольте и др., 1976; Шилли и Харви, 1981), формируются в открытых расходящихся магнитных трубках.

Известно, что КД расположены в крупномасштабных магнитных областях, с преобладанием одной полярности магнитного поля (МакИнтош и др., 1976; Болин, Шилли, 1978). Иногда этот факт также используют в качестве доказательства открытой магнитной конфигурации в КД, хотя это, по-видимому, не совсем корректно.

И, наконец, косвенным аргументом в пользу того, что КД это области с открытыми линиями поля, являются одновременные измерения КД на разных высотах (например, в хромосферной линии  $\text{HeI } 10830\text{\AA}$  и в корональном излучении в мягком рентгене). Калер и др. (1983) показали, что размеры наиболее крупных дыр, измеренных в этих спектральных диапазонах, близки.

В то же время есть серьезные основания полагать, что между КД и открытыми магнитными конфигурациями не существует однозначного соответствия (Степанян, Маланушенко, 1996; Степанян, Малащук, 2001; Хадсон, 2002).

В первых двух процитированных выше работах по измерениям КД в различных спектральных линиях был сделан вывод, что размеры некоторых КД уменьшаются с высотой. Это интерпретируется как формирование в этих КД преимущественно замкнутых линий магнитного поля. В работе Хадсон (2002) упор сделан на отсутствие в настоящее время ясных теоретических (или физических)

представлений о формировании и изменениях со временем открытых линий поля в короне, а также на проблеме изменения со временем открытого магнитного потока в межпланетном пространстве, известной как “flux catastrophe”, отмеченной в работе МакКомас и др. (1992).

Во второй статье настоящей серии (Бугаенко и др., 2004а) на нескольких примерах проведено сравнение высотного изменения площади КД с рассчитанной различными методами высотной стратификацией магнитного поля. Сравнение КД с открытыми магнитными трубками (ОМТ), полученными из расчетов “мгновенного” распределения магнитного поля в короне в потенциальном приближении с использованием Vd – технологии (Руденко, 2001), показало, что КД, площади которых увеличиваются с высотой, почти полностью оказываются в области ОМТ. При уменьшении площади КД с высотой дыра оказывается в области замкнутых линий поля. Другие методы расчета магнитного поля в области этой КД дают несколько иные результаты: частично эта дыра оказывается в области открытых линий поля. В любом случае представляется, что КД, площадь которых уменьшается с высотой, иначе связаны с открытыми линиями поля, чем дыры, площадь которых с высотой не меняется или растет.

Неоднозначной является также связь КД и ОМТ с высокоскоростными потоками солнечного ветра на орбите Земли. Если для периода работы Скайлэб была установлена практически однозначная связь между дырами, зарегистрированными в мягком рентгеновском излучении, и быстрыми потоками СВ (Нольте и др., 1976), то связь между КД, зарегистрированными в линии HeI 10830Å, и высокоскоростными потоками СВ оказывается уже не столь однозначной (неопубликованные результаты авторов данной работы; см. также рисунки в работе Шилли и Харви, 1981).

Сравнение в работе Файнштейн и др. (2004) открытых магнитных трубок, полученных из расчетов “мгновенного” магнитного поля в короне в рамках модели “потенциальное поле – поверхность источника” с использованием Vd – технологии (Руденко, 2001), с высокоскоростными потоками СВ на орбите Земли за период 1996 – 2002 г. показало, что и здесь отсутствует однозначное соответствие между рассчитанными ОМТ и быстрыми потоками СВ.

В настоящей работе на относительно большом статистическом материале исследуется связь двух типов КД, обнаруженных в работах Степанян и Маланушенко (1996), Степанян и Малащук (2001) и Бугаенко и др. (2004а) с ОМТ, а также с высокоскоростными потоками СВ на орбите Земли.

## 2 Данные и методы исследования

В исследовании использовался большой массив наблюдательных данных за 2001 и 2002 годы, полученных в эксперименте СПИРИТ на космическом аппарате КОРОНАС-Ф (Ораевский, Собельман, 2002) и Универсальным спектрофотометром на телескопе БСТ-2 НИИ КрАО (Степанян и др., 2000). Расчеты ОМТ проводились по измерениям магнитных полей в Национальной солнечной Обсерватории Китт-Пик. Сведения о солнечном ветре на орбите Земли были получены по данным сайта OMNIweb в Интернете (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/omniweb/>).

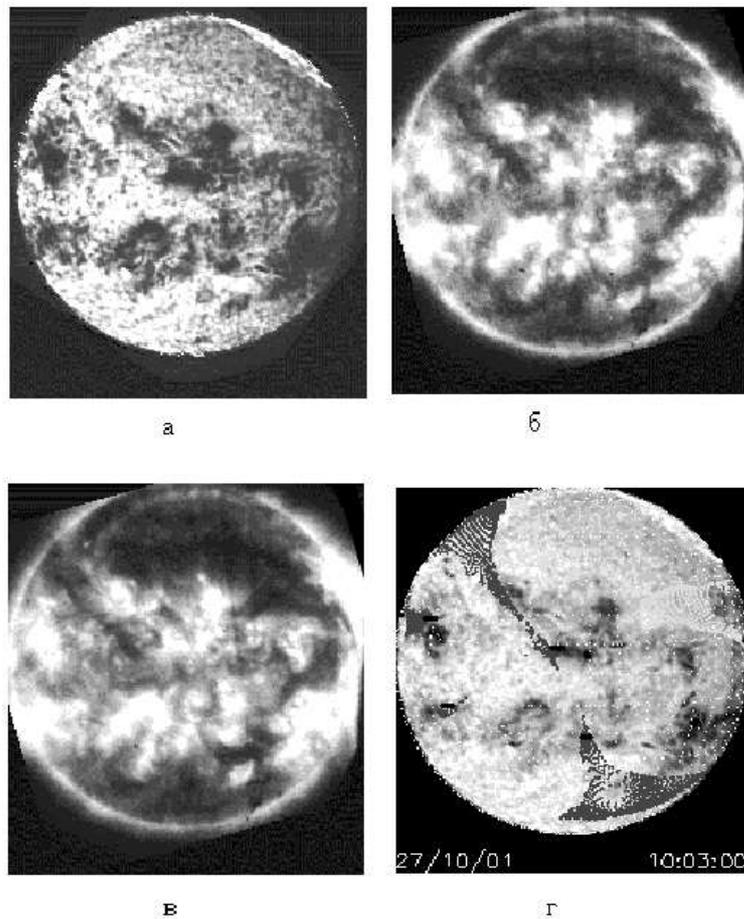
В работе анализировались изображения Солнца в линиях крайнего ультрафиолета Fe IX, X 1171Å, Fe XI 1195Å, а также в инфракрасной линии HeI 110830Å.

Особенности проведения наблюдений инструментами, установленными на космическом аппарате КОРОНАС-Ф и на телескопе БСТ-2, методы обработки полученных данных, а также методы расчета магнитного поля в короне Солнца описаны в первой статье этой серии (Бугаенко и др., 2004). О принятых в настоящей работе изменениях в методах обработки данных будет сказано ниже.

На рис. 1. дан пример исходных данных – изображений Солнца в линиях HeI 110830Å, Fe IX, X 1171Å, Fe XI 1195Å и расчетов оснований ОМТ (точки), нанесенных на изображение солнечного диска в линии HeI 110830Å.

В Таблице 1 приводится список наблюдений, использованных в данной работе. Всего была проанализирована 221 КД. В 1-м и 3-м столбцах указаны даты наблюдений, во 2-м и 4-м столбцах – количество корональных дыр, для которых были определены площади в линии HeI 110830Å и, хотя бы, в одной из корональных линий.

В методы обработки изображений Солнца, изложенные в статье 1 данной серии (Бугаенко и др., 2004) нами внесены некоторые изменения.



**Рис. 1.** Изображения Солнца в отдельных спектральных линиях и основания открытых линий магнитного поля в короне. а – He I  $\lambda 10830\text{\AA}$ ; б – Fe IX, X  $\lambda 171\text{\AA}$ ; в – Fe XI  $\lambda 195\text{\AA}$ ; г – расчеты оснований открытых магнитных трубок наложены на изображение Солнца в линии He I  $\lambda 10830\text{\AA}$

*Новый метод учета неравномерного фона в кадре при обработке изображений Солнца в корональных линиях, полученных в эксперименте СПИРИТ на КА КОРОНАС-Ф.*

В предыдущих работах серии средний фон в кадре с изображениями Солнца в корональных линиях Fe IX, X  $\lambda 171\text{\AA}$ , Fe XI  $\lambda 195\text{\AA}$ , Fe XV  $\lambda 284\text{\AA}$  определялся и учитывался отдельно для двух половин кадра. Напомним, как это делалось. В верхнем и нижнем углах кадра выбирались две области, которые находились вне диска Солнца к востоку от центрального меридиана. В выбранных областях находились средние значения интенсивностей  $I_1$  и  $I_2$ . Величина  $I_1$  вычитались из верхнего полукадра, а  $I_2$  – из нижнего полукадра. Границу этих полукадров определяет полоса, проходящая по кадру с изображением Солнца.

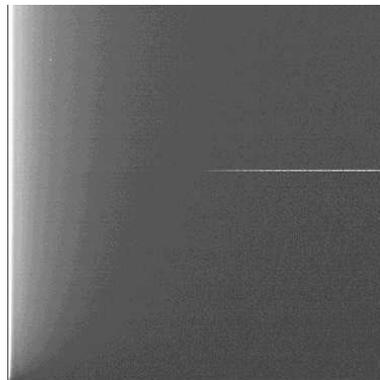
Оказалось, что вблизи западного края Солнца на всех анализировавшихся кадрах на фоне имеется светлая вертикальная полоса. Ее яркость заметно меняется с расстоянием от края кадра и может влиять на измерения яркости на диске Солнца, особенно в его западной части. Нами была произведена оценка этого влияния.

Для серии изображений Солнца в линии  $195\text{\AA}$  за 10.10.2002, 10.11.2002, 13.11.2002 были взяты отдельные кадры, на которых был только фон (см. рис. 2). Из кадра с изображением Солнца вычитался кадр с фоном за тот же день.

Неравномерность фона по-разному влияет на определение интенсивности объектов, располо-

**Таблица 1.** Список наблюдений

Дата	Число КД с измерением площадей	Дата	Число КД с измерением площадей
25.10.01	3	14.06.02	8
27.10.01	5	16.06.02	4
29.10.01	8	23.06.02	4
08.11.01	4	24.06.02	3
03.12.01	5	25.06.02	3
07.12.01	3	28.06.02	4
06.02.02	6	29.06.02	4
07.02.02	6	01.09.02	4
12.02.02	3	02.09.02	3
12.05.02	3	04.09.02	1
13.05.02	5	21.09.02	6
14.05.02	4	23.09.02	6
15.05.02	3	03.10.02	6
16.05.02	5	10.10.02	6
17.05.02	5	21.10.02	4
18.05.02	8	13.11.02	3
20.05.02	5	19.11.02	5
22.05.02	3	21.11.02	7
23.05.02	3	10.12.02	3
26.05.02	5	11.12.02	7
27.05.02	5	12.12.02	6
29.05.02	3	16.12.02	6
10.06.02	5		

**Рис. 2.** Отдельный кадр с фоном. Светлая горизонтальная линия – граница между полукадрами (запад на кадре слева)

женных в западном и восточном полушариях Солнца. Для корональных дыр в восточных областях Солнца учет неравномерного фона понижает интенсивность на 20%, а на западе на 35 – 40% по сравнению с исходным значением интенсивности без учета фона. Для активных областей понижение интенсивности на востоке около 15% и 25% на западе. Использование при вычитании из полного изображения кадра фона, полученного не в день наблюдения, на эти результаты влияет слабо.

Таким образом, при обработке наблюдений Солнца, полученных на КА КОРОНАС-Ф в эксперименте СПИРИТ, необходимо учитывать изменение фона по всему кадру. Для этого надо иметь

кадр без изображения Солнца (кадр фона) хотя бы один раз в течение несколько дней и вычитать его из кадра с изображением Солнца. Это особенно важно при исследовании корональных дыр.

*Скорректированная методика определения площадей КД на трех уровнях в атмосфере Солнца и выделение дыр с открытой и замкнутой магнитной конфигурацией.*

В данной статье, как и в статьях 2 и 3 настоящей серии (Бугаенко и др., 2004а; Бугаенко и др., 2004б), площадь КД находится с помощью метода, не предполагающего предварительного нахождения ее границы. Его суть заключается в следующем. Сначала на нормированных по яркости изображениях Солнца, полученных в один и тот же день в разных спектральных линиях по двум визуальным критериям (яркость и контраст), очерчивается единая область, заведомо включающая КД на всех изображениях. После этого по каждому наблюдению определяется часть этой области, занятая элементами (пикселями) с яркостью  $I_{\text{КД}}$ , характерной для КД на изображениях в данной линии. Площадь выделенного таким образом участка солнечной поверхности (рассчитанного в кв. км) и принималась за площадь КД. В отличие от статей 2 и 3, характерными интенсивностями для КД при наблюдениях в линии HeI 10830Å считались  $I_{\text{КД}} > 1$ , а при наблюдениях в корональных линиях Fe IX, X 171Å, Fe XI 195Å  $I_{\text{КД}} < 1$  на нормированных по яркости изображениях Солнца.

Кроме того, производился отбор корональных дыр, принятых к дальнейшей обработке. Мы не рассматривали КД, центры которых находились на расстояниях от центра Солнца более  $0.9 R_0$  (здесь  $R_0$  – радиус Солнца).

Был принят следующий критерий “открытости” силовых линий магнитного поля в КД: линии поля в КД считались открытыми, если ее площадь по измерению в одной из корональных линий (171Å или 195Å) превышает или равна площади, измеренной в линии HeI 10830Å, с точностью до 15% минимальной из измеренных площадей.

Иллюстрацией критерия “открытости” может служить рис. 3. На нем в верхнем ряду приведены нормированные изображения Солнца в двух линиях HeI 10830Å и Fe IX, X 171Å, а в нижнем ряду для этих изображений представлены изофоты, характерные для КД, наблюдаемых в этих линиях. Видно, что для КД в центре диска площадь уменьшается при переходе от изображения в HeI 10830Å к изображению в линии Fe IX, X 171Å. В этом случае мы считаем КД закрытой. Для восточной и южной КД картина обратная – площадь от левого к правому изображению увеличивается, т.е. КД открытая. Для северной КД визуально нельзя определить, как меняется площадь. Только численная обработка позволит решить вопрос об “открытости” КД.

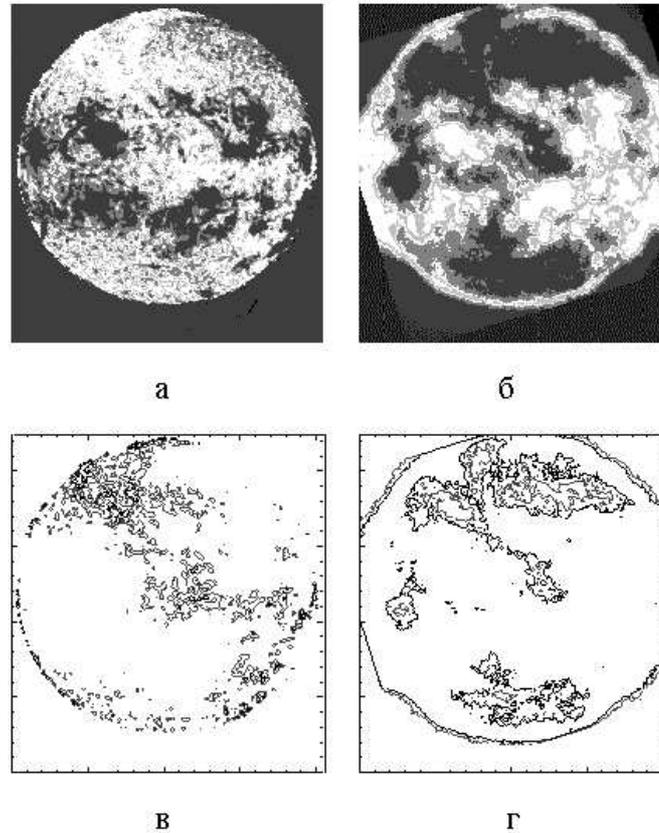
*Метод определения конфигураций открытых магнитных трубок (ОМТ), использованный в данной работе.*

Методы определения конфигураций ОМТ в короне подробно описаны в нашей первой работе из данной серии (Бугаенко и др., 2004). Здесь мы кратко опишем один из этих методов, который, в основном, будет использоваться в данной работе. Речь идет о методе расчета “мгновенного”, т.е. в момент измерения фотосферного поля, распределения магнитного поля в короне в рамках модели “потенциальное поле – поверхность источника” с использованием Vd – технологии (Руденко, 2001). Этот метод позволяет по ежедневной магнитограмме – распределению на видимой поверхности Солнца измеряемой компоненты поля по лучу зрения Vd, рассчитать над видимой полусферой Солнца все компоненты поля (в сферической системе координат с центром в центре Солнца) между поверхностью Солнца и поверхностью источника – сферой с радиусом  $R_{SS}=2.5R_0$ . При этом считается, что магнитное поле на поверхности источника радиальное во всех точках.

Далее, из каждого узла расчетной сетки на поверхности источника на поверхность Солнца проводится силовая линия магнитного поля. При этом формируется несколько ОМТ, пример оснований которых на поверхности Солнца показан точками на рис. 1.

Для выделения высокоскоростных потоков (ВСП) солнечного ветра (СВ) на орбите Земли по распределениям по времени модуля направленной скорости СВ  $V(t)$  из OMNIweb мы использовали формальный критерий. К ВСП относились лишь участки квазистационарного СВ со скоростью  $V \geq 400$  км/с. Это означает, что из рассмотрения исключались спорадические потоки с повышенной скоростью: области СВ за фронтом ударной волны, магнитные облака и другие межпланетные корональные выбросы массы.

При выделении ВСП мы также учитывали и другие их характерные свойства в квазистаци-



**Рис. 3.** Изображения Солнца в линиях HeI 10830Å (а) и Fe IX, X λ 171Å (б). в,г – изофоты, характерные для КД, построенные для этих изображений

онарном СВ: повышенную температуру и пониженную плотность протонов, а также пониженное значение модуля магнитного поля и др. Если в ВСП какие-то из этих параметров выходили за пределы характерных значений, то, как правило (за небольшим исключением) эти потоки не анализировались. Считалось, что они либо сами являются спорадическими потоками, не выделенными нами в процессе отбора таких событий, либо квазистационарными ВСП, сильно возмущенными спорадическими потоками.

Для нахождения ВСП солнечного ветра на орбите Земли, связанных с выделенными КД использовалась следующая методика. С помощью соотношения

$$T_{V/2} = T_{CH} \pm dT + (4\text{сут.} \pm 1.5\text{сут.}) \quad (1)$$

находился интервал времени, в пределах которого на орбите Земли должен регистрироваться фронт ВСП СВ, связанного с выделенной КД (или, другими словами, источником которого является выделенная КД).

Здесь  $T_{V/2}$  – момент времени, когда на орбите Земли регистрируется середина фронта ВСП,  $T_{CH}$  – момент регистрации КД,  $dT$  – интервал времени между моментом регистрации дыры и моментом, когда центр дыры оказывается на центральном меридиане. Если КД в момент  $T_{CH}$  зарегистрирована к востоку от центрального меридиана, то перед  $dT$  ставится знак (+), если к западу от центрального меридиана, то знак (–). При этом

$$dT = (|F_{CH}|/\Omega). \quad (2)$$

Здесь  $F_{CH}$  – долгота центра КД, отсчитываемая от центрального меридиана ( $F_{CH} < 0$  к востоку,  $F_{CH} > 0$  к западу от центрального меридиана),  $\Omega$  – угловая скорость вращения Солнца, соответствующая длительности кэррингтоновского оборота.

В тех случаях, когда КД была связана с ОМТ, момент можно определить более точно с помощью эмпирических соотношений, использующих характеристики ОМТ, и полученных в работе Файнштейн и др. (2004).

Высокоскоростной поток квазистационарного СВ, фронт которого попадал в интервал времени, определяемый соотношением (1), считался связанным с выделенной КД. Если же в такой интервал времени не попадал фронт ВСП по данным OMNIweb, то сразу сделать вывод о том, что анализируемая КД не является источником ВСП нельзя. Дело в том, что в некоторых случаях ВСП из КД могут заметно отклоняться по широте от радиального направления в меридиональном направлении на расстояниях до  $(4 - 5)R_0$  (на больших расстояниях траектории частиц ВСП практически радиальны). В результате на орбите Земли такие потоки могут оказаться вне плоскости эклиптики и в этом случае не будут зарегистрированы космическими аппаратами. Причиной такого искажения траектории ВСП является хорошо известное из наблюдений короны отклонение от радиального направления вблизи Солнца пояса корональных стримеров (Еселевич, Еселевич, 2002). Отклонение по широте участка пояса стримеров приводит к отклонению прилегающего к нему быстрого потока СВ. Для оценки величины такого отклонения пояса стримеров мы использовали соотношение, полученное в работе Файнштейн и др. (2004). С учетом этого эффекта мы считали, что КД, связанная с ОМТ и площадь которой не уменьшается с расстоянием, связана с быстрым потоком СВ, если удавалось показать, что регистрируемый в соответствующее время медленный СВ ( $V < 400$  км/с) возник на орбите Земли вследствие вытеснения быстрого потока СВ из этой дыры из плоскости эклиптики.

Соответствие между КД и ВСП СВ на орбите Земли устанавливалось не для всех дыр из Таблицы 1. Из рассмотрения исключались КД, для которых с использованием различных критериев было установлено, что ВСП из них (если они существуют) не могут пересечь плоскость эклиптики и быть зарегистрированными космическими аппаратами вблизи Земли (по иным причинам, чем обсуждавшееся выше отклонение ВСП от радиального направления). Некоторые из таких критериев обсуждались в работах Еселевич и Файнштейн (1989) и Еселевич и др. (1990), а некоторые из использовавшихся критериев не опубликованы и являются рабочим инструментом авторов в такого рода исследованиях.

Было, например, установлено, что на орбите Земли практически не регистрируются ВСП квазистационарного СВ, вытекающие из полярных КД, если границы дыры удалены от экватора более, чем на  $50 - 60$  градусов (Еселевич и др., 1990). Если между КД и плоскостью эклиптики находится протяженный участок пояса или цепочки корональных стримеров, то в этом случае ВСП также не пересекает плоскость эклиптики. Напомним, что цепочками стримеров называются крупномасштабные корональные структуры, разделяющие корональные дыры одинаковой преимущественной полярностью магнитного поля (Еселевич и др., 1991; Еселевич и др., 1999). Положения пояса и цепочек стримеров над видимым диском Солнца могут быть найдены с помощью расчетов магнитного поля в короне в потенциальном приближении (Еселевич и др., 1990; 1999), или с использованием изображений короны, полученных коронографами LASCO C2 и C3 (Файнштейн, Манженко, 2002). В данной работе в качестве индикатора пояса стримеров использовалась нейтральная линия магнитного поля на поверхности источника, полученная как в наших расчетах, так и в расчетах Солнечной Обсерватории Уилкоккса (Стенфорд), результаты которых выставлены на сайте (<http://wso.stanford.edu/synsource.html>) этой обсерватории в Интернете.

И, наконец, важным критерием для идентификации ВСП, связанного с рассматриваемой КД, является одинаковая полярность магнитного поля на Солнце в КД и межпланетного магнитного поля в области ВСП на орбите Земли. Анализ полярности в КД и в ВСП проводился для всех рассмотренных дыр.

### 3 Результаты

#### 3.1 Сравнение расчетов открытых магнитных мрубок с корональными дырами различных типов

Анализ всего материала показал, что основания рассчитанных ОМТ расположены не только в области КД. Они нередко наблюдаются вне КД, в том числе вблизи (и даже “внутри”) активных областей и вдоль протяженных волокон. В некоторых случаях это обусловлено погрешностью расчетов ОМТ. Особенно это касается случаев, когда КД (и связанная с ней ОМТ) находятся вблизи лимба. Возможность возникновения погрешности в расчетах магнитного поля вблизи поверхности Солнца для прилиम्бовых участков расчетной области отмечалась в работе Файнштейн и др. (2003). В то же время мы не можем исключить, что в некоторых случаях появление открытых магнитных трубок вне корональных дыр отражает физическую реальность в распределении магнитного поля в короне. Но анализ всех особенностей распределения магнитных полей в атмосфере Солнца выходит за рамки данной работы. Ниже мы лишь рассмотрим связь рассчитанных ОМТ с различными типами КД, регистрируемых в нескольких спектральных линиях солнечного излучения.

Как уже отмечалось, по характеру изменения площади КД в различных спектральных линиях (или, что эквивалентно, с высотой) КД были разделены на два класса. В КД первого класса их площадь с высотой не меняется либо возрастает. В КД второго класса их площадь с высотой уменьшается. Предполагается, что магнитная структура КД первого класса преимущественно сформирована открытыми силовыми линиями поля, а магнитная структура КД второго класса – замкнутыми. В последнем случае линии поля, начинающиеся внутри КД, отклоняются от поверхности Солнца не более, по-видимому, чем на несколько радиусов Солнца, а затем возвращаются в фотосферу.

В дальнейшем для обозначения дыр первого класса мы будем использовать термин “открытые” КД, а для обозначения дыр второго класса будет использоваться термин “замкнутые” КД.

При сопоставлении КД с ОМТ будем считать, что ОМТ связана с КД, если она полностью или частично перекрывается с КД, или соприкасается с КД значительной частью своей границы. Примеры возможного соответствия между КД и ОМТ видны на рис. 1.

При проведении статистического анализа соответствия КД разного типа и ОМТ мы использовали следующий подход. Связь между КД и ОМТ определялась каждый день для всех выделенных для анализа дыр независимо от того, какой характер связи был установлен для этих дыр в предшествующие дни и то, что день ото дня тип КД (“открытая” или “замкнутая”) мог меняться. Используя результаты такого анализа, можно попытаться “почувствовать” является ли изменение класса КД день ото дня случайным явлением, связанным с погрешностью определения площади КД в разных спектральных линиях, или это отражает реальную перестройку магнитного поля в КД.

На рис. 4. приведены примеры с различным характером соответствия между КД двух типов и ОМТ.

Результаты анализа соответствия между “открытыми” и “замкнутыми” КД и ОМТ приведены в Таблице 2. Проценты в скобках указаны от общего числа открытых (1 и 2 столбцы) и закрытых КД (3 и 4 столбцы) по критерию площадей.

Как видно из таблицы 2, совпадение характеристики “открытости” с наличием ОМТ и “замкнутости” с отсутствием ОМТ наблюдается для 70% всех КД.

Как уже отмечалось, характер связи КД и ОМТ в значительной степени зависит от точности расчетов ОМТ. Сравнение дыр и ОМТ в некоторых случаях позволяет сделать вывод о точности расчетов ОМТ использованным в данной работе методом. Так, 12.12.02 к востоку от центрального меридиана отчетливо наблюдалась КД, лишь в небольшой степени совпадавшая с ОМТ. При этом основная часть ОМТ находилась восточнее КД. 16.12.02 КД оказалась вблизи центрального меридиана (ЦМ), а связанная с ней ОМТ была зарегистрирована западнее КД. Т.к. форма и размеры КД за это время существенно не изменились (сохранился также ее тип – “замкнутая”), то мы можем сделать вывод, что изменение положения ОМТ относительно КД связано, скорее всего, с погрешностью расчетов магнитного поля в короне.

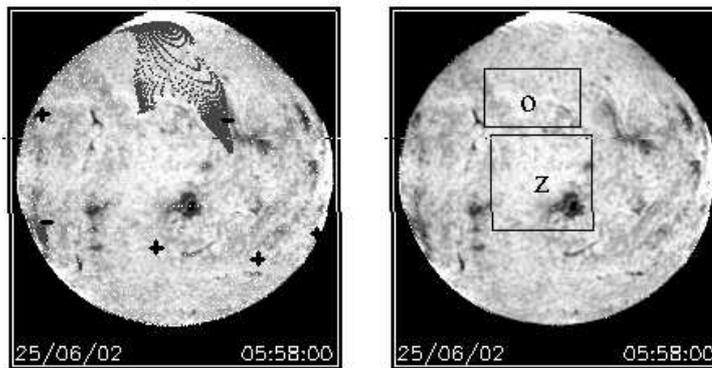


Рис. 4. (а). – пример “замкнутой”, КД (на рисунке справа она обозначена буквой “Z”), для которой нет связанной ОМТ

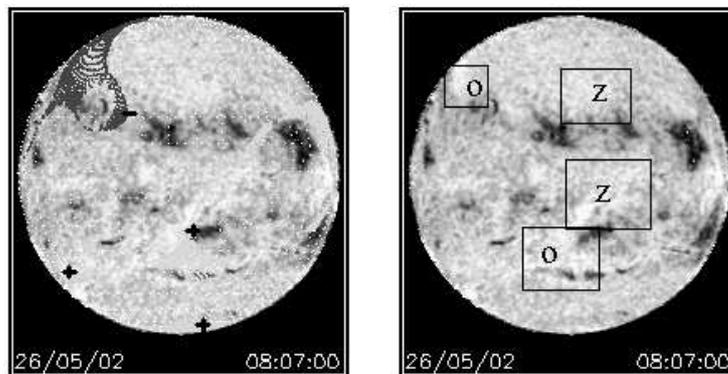


Рис. 4. (б). – пример “замкнутой” КД (в центре диска), для которой есть связанная ОМТ

### 3.2 Связь корональных дыр различных типов с высокоскоростными потоками солнечного ветра на орбите Земли

Каждая из отобранных КД была проанализирована с использованием методики, описанной во втором разделе, на предмет связи с высокоскоростным потоком квазистационарного СВ на орбите Земли. При установлении связи между КД и быстрыми потоками СВ учитывались также следующие обстоятельства. Если на ВСП СВ “претендовали” две равноценные КД, и отдать предпочтение одной из них не представлялось возможным, связанной с КД считалась одна из дыр без конкретизации. Пример – две КД типа “открытые” обе связанные с ОМТ и наблюдавшиеся к западу и юго-западу от центра солнечного диска 27.05.02, могли стать источником ВСП, зарегистрированного 26 – 27.05.02. В другом случае нельзя было разделить две “открытые” КД, которые оказались не связанными с ВСП (18.05.02, к западу от ЦМ). Эти дыры также рассматривались как одно событие. В случае, если на ВСП “претендовали” две КД, одна из которых “открытая” и связанная с ОМТ, другая “замкнутая” и не связанная с ОМТ, связанной с ВСП считалась первая из этих дыр (10.06.02, дыры в центре и к югу от центра солнечного диска). И, наконец, из двух “открытых” КД, претендовавших на связь с ВСП, предпочтение отдавалось КД, связанной с ОМТ (14.06.02, дыры в центре диска и к северо-востоку от центра солнечного диска).

Оказалось, что большая часть “открытых” КД, для которых, согласно проведенному анализу, возможные ВСП должны пересекать плоскость эклиптики, связана с ВСП СВ на орбите Земли, а большинство “замкнутых” КД не связаны с ВСП. Тем не менее, некоторые “открытые” дыры оказались не связанными с ВСП, и, наоборот, часть “замкнутых” КД были связаны с ВСП солнечного

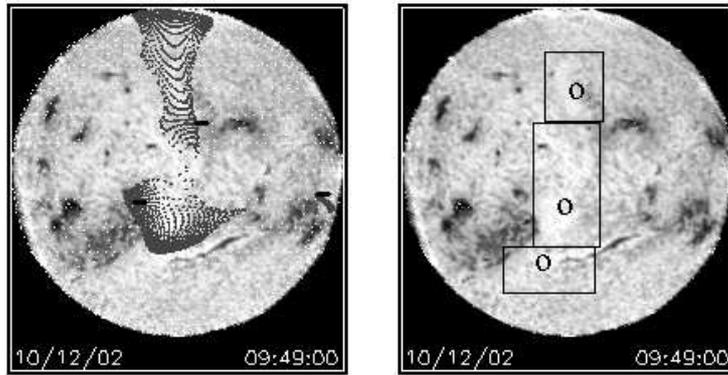


Рис. 4. (в). – пример “открытых” КД (на рисунке справа они обозначены буквой “О”), для которых есть связанные ОМТ

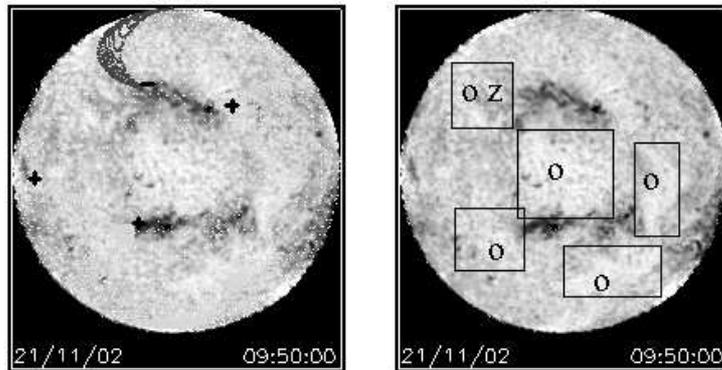


Рис. 4. (г). – пример “открытой” КД (в центре диска), для которой нет связанной ОМТ

ветра (Табл. 3.). Некоторые из возможных причин этого мы обсуждали в разделе 2.

Тем не менее, представляется, что доля “замкнутых” КД, оказавшихся связанными с расчетными ОМТ, превышает пределы, обусловленные какими-то физическими факторами. Частично это может быть связано с погрешностью расчетов ОМТ использовавшимся в данной работе методом. Исследование возможностей этого метода (точности расчетов и др.), направленное на улучшение качества расчетов магнитного поля в короне, в настоящее время еще не завершено и, в дальнейшем, по мере корректировки метода, будут корректироваться и результаты данной работы. Предполагается также совершенствовать метод определения площади КД по данным в различных спектральных линиях.

Что касается относительно большого числа “замкнутых” КД, оказавшихся связанными с ВСП, то представляется, что основная причина этого – ошибка в определении типа КД (“открытая” или “замкнутая”) в некоторых случаях. Косвенным доказательством этого являются, например, КД,

Таблица 2. Соответствие между “открытыми” и “замкнутыми” КД и ОМТ

“Открытые” КД 120 (100%)		“Замкнутые” КД 81 (100%)	
КД с ОМТ	КД без ОМТ	КД с ОМТ	КД без ОМТ
85 (71%)	35(29%)	26(33%)	55(67%)

наблюдавшиеся 28 и 29 июня 2002 г. и связанные с ВСП, фронт которого был зарегистрирован 05 – 06.07.02. 28.06.02 эта КД была определена как “открытая”, а 29 как “замкнутая”. При этом в обоих случаях КД была вблизи центрального меридиана и надежно связана с ОМТ. Именно при таком положении КД условия регистрации на орбите Земли ВСП из этой дыры (если он существует) наилучшие. Фронт ВСП действительно был зарегистрирован 05 – 06.07.02. Предположить, что этот поток СВ существовал 29.06.02 вследствие движения корональной плазмы поперек силовых линий магнитного поля (КД в этот день “замкнутая”!) довольно сложно. Хотя при определенных условиях такие движения могут формироваться (Подгорный, Подгорный, 2004), предположение, что эти условия реализуются столь часто (в нашем случае доля “замкнутых” КД, связанных с ВСП составляет ~ 36%) кажется нереалистичным.

Косвенно наш вывод подтверждают результаты, характеризующие связь “замкнутых” КД с ОМТ. Оказалось, что из десяти “замкнутых” дыр, связанных с ВСП, 6 связаны с ОМТ. Эта доля существенно больше доли “открытых” КД, связанных с ОМТ (см. Таблицу 2). Более того, есть основания полагать, что и “замкнутая” КД, зарегистрированная к западу от ЦМ 06 и 07.02.02, связана с ОМТ (в нашем анализе по формальным признакам она была отнесена к числу дыр, не связанных с ОМТ). Действительно, эта КД по форме и размерам похожа на КД, которая наблюдалась 12 и 16.12.02 и ее связь с ОМТ обсуждалась в предыдущем разделе. С северо-запада и юго-запада к КД, наблюдавшейся 06 и 07.02.02, примыкали ОМТ. К сожалению, у нас нет полного набора данных для периода, когда эта КД находилась к востоку от центрального меридиана и вблизи него. Но можно предположить, что, находясь к востоку от центрального меридиана, связанная с этой дырой ОМТ, как и в случае дыры от 12 и 16.12.02, располагалась к востоку от нее. В обоих случаях можно предположить, что при проведении более точных расчетов ОМТ данные дыры окажутся связанными с открытыми магнитными трубками в короне.

Тогда получается, что из 10 “замкнутых” дыр, связанных с ВСП, 8 связаны с ОМТ. Такая пропорция с учетом результатов Таблицы 2 кажется совершенно нереалистичной.

**Таблица 3.** Связь КД разных типов с ВСП СВ

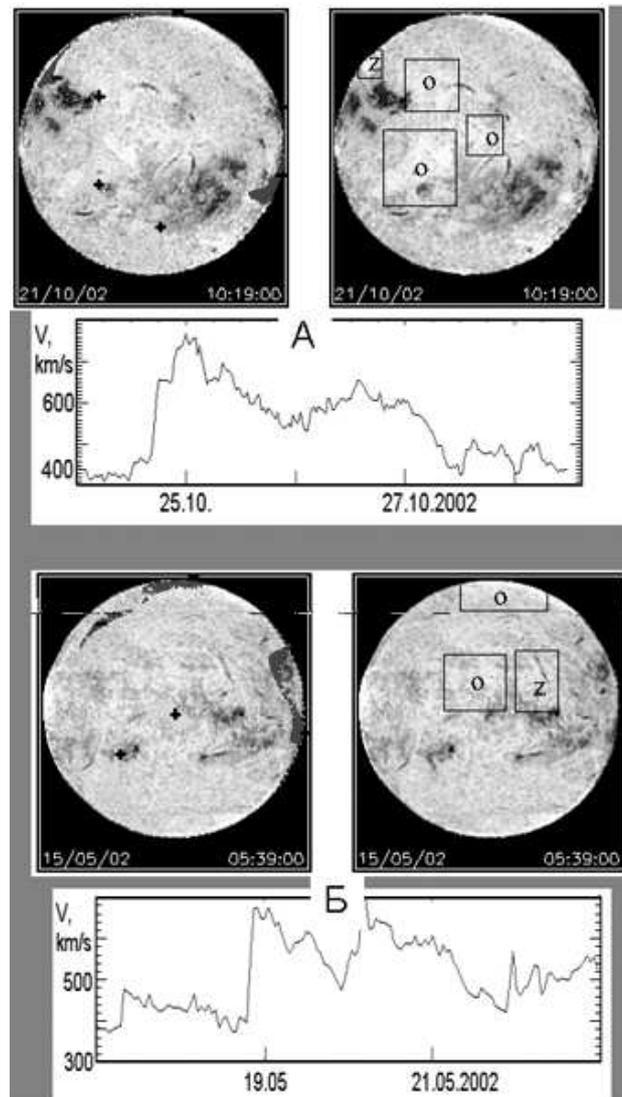
Число анализировавшихся “открытых” КД	Число “открытых” КД, связанных с ВСП	Число анализировавшихся “замкнутых” КД	Число “замкнутых” КД, связанных с ВСП
44	37 (84%)	29	10(34.5%)

На рис. 5 (а) показан пример связанного ВСП с “открытой” КД. Рис. 5 (б) иллюстрирует случай, когда связанный с “открытой” КД быстрый поток отсутствует. В данном случае, скорее всего, ВСП был вытеснен из плоскости эклиптики наклоняющимся к экватору поясом стримеров. Рис. 5 (в) показывает случай “замкнутой” КД, не связанной с ВСП. И, наконец, на рис. 5 (г) дан пример, когда ВСП связан с “замкнутой” КД.

Знаки “+” или “-” на изображениях открытых магнитных трубок или рядом с ними обозначают преимущественную полярность магнитного поля в КД.

В Таблице 4 даны итоговые статистические сведения, относящиеся к связи КД различных типов с ВСП солнечного ветра на орбите Земли.

Символы С, Ю обозначают положение центра КД к северу или к югу от экватора; В, З – центры КД расположены к востоку или к западу от центрального меридиана; С – З, С – В, Ю – З, Ю – В центры КД расположены соответственно к северо-западу, северо-востоку, юго-западу, юго-востоку от центра солнечного диска. Наличие двух символов с вопросом в столбце “З” означает, что на один ВСП “претендуют” две КД с указанными положениями. Знак вопроса в столбце “5” означает, что выбор даты пересечения Землей середины потока ВСП вызывает затруднение.



**Рис. 5. (а, б).** – случаи, когда “открытая” КД связана (а) и не связана (б) с ВСП СВ на орбите Земли. Участки скорости СВ с  $V > 400$  км/с 19 – 21.05.02 характеризуют спорадические потоки, а не квазистационарные течения СВ, скорость которых в этот период не превышает, по-видимому, 400 км/с.

#### 4 Заключение

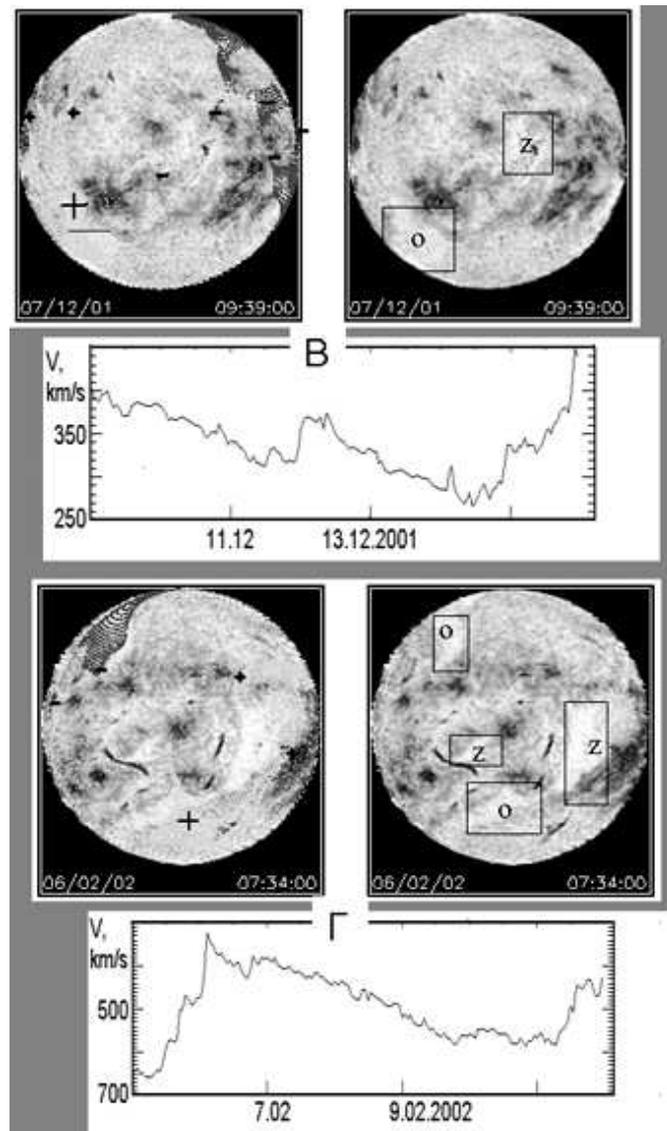
Наиболее значимые результаты данной работы можно сформулировать следующим образом.

Характер связи КД, зарегистрированных одновременно в различных спектральных линиях хромосферы и короны, с полученными из расчетов открытыми магнитными трубками (ОМТ) и высокоскоростными потоками (ВСП) квазистационарного СВ на орбите Земли радикально различается для двух рассмотренных классов КД (“открытых” и “замкнутых”).

КД первого типа оказались вполне удовлетворительно связаны с ОМТ и ВСП.

В то же время обнаружено, что большая часть “замкнутых” КД не связана с ОМТ и ВСП квазистационарного СВ.

Наличие относительно большого количества “открытых” КД, оказавшихся не связанными с ВСП



**Рис. 5.** (в). – пример “замкнутой” дыры, не связанной с ВСП; (г). – пример “замкнутой” дыры, связанной с ВСП

СВ, может быть вполне убедительно объяснено в рамках существующих представлений о крупномасштабной структуре короны (см. раздел 2 и 3).

Полученные результаты статистически вполне обоснованы для “открытых” КД и несколько хуже для “замкнутых” КД с точки зрения их связи с ВСП.

Эти факты свидетельствуют, прежде всего, о том, что разделение КД на два класса по характеру изменения их площади с высотой оказывается физически вполне обоснованным, а предложенная в предшествовавших работах авторов физическая интерпретация различия КД двух типов представляется правильной.

Для “открытых” КД характерна магнитная конфигурация, основной составляющей которой являются открытые силовые линии магнитного поля, которые начинаются на поверхности Солнца и уходят в межпланетное пространство.

Основой магнитной конфигурации “замкнутых” КД являются, по-видимому, замкнутые линии

Таблица 4. Связь КД разных типов с ВСП СВ

(а).Открытые" КД				
№п/п	Дата наблюдения	Положение КД на диске Солнца	Связь КД с ВСП	Дата пересечения Землей середины фронта ВСП
1	2	3	4	5
1	29.10.01	В? З?	-	
2	08.11.01	С - З	+	12.11.02
3	03.12.01	Ю - З	+	04.12.01
4	07.12.01	Ю - В	+	15-16.12.01
5	07.02.02	Ц	+	11.02.02
6	12.02.02	Ц? В?	+	19-20.02.02
7	14.05.02	С - В	-	
8	18.05.02	З	-	
9	18.05.02	В	+	27.05.02?
10	20.05.02	В	+	27.05.02?
11	22.05.02	Ц	+	27.05.02
12	27.05.02	З? Ю-З?	+	27.05.02?
13	29.05.02	В	+	02.06.02?
14	10.06.02	З	+	08-09.06.02
15	10.06.02	Ю	+	16.06.02
16	14.06.02	Ц? С - В?	+	19.06.02
17	14.06.02	Ю - З	+	16.06.02
18	16.06.02	?	+	16.06.02
19	24.06.02	С - В	+	30.06-01.07.02
20	25.06.02	С - В	+	30.06-01.07.02
21	28.06.02	Ю	+	05-06.07.02
22	28.06.02	В	-	
23	28.06.02	С - З	+	30.06-01.07.02
24	29.06.02	С	+	30.06-01.07.02
25	29.06.02	В	-	
26	01.09.02	Ю	+	04.09.02
27	02.09.02	С - З	-	
28	04.09.02	Ц	+	08.09.02
29	21.09.02	Ю - В	+	02.10.02
30	03.10.02	С	+	07-08.10.02
31	10.10.02	С - В? С?	+	15.10.02
32	10.10.02	В	+	15.10.02
33	21.10.02	Ю - В	+	24-25.10.02
34	21.10.02	Ю - З	+	18-19.10.02
35	13.11.02	Ю	+	15.11.02
36	19.11.02	З	+	23.11.02
37	21.11.02	Ц	-	
38	21.11.02	З	+	21-22.11/02
39	10.12.02	Ц	+	14.12.02
40	11.12.02	Ц	+	14.12.02
41	11.12.02	Ю - В	+	19.12.02
42	12.12.02	З	+	14.12.02
43	12.12.02	В	+	19.12.02
44	16.12.02	В	+	22-23.12.12

**Таблица 4.** Связь КД разных типов с ВСП СВ

(б). “Замкнутые” КД				
№п/п	Дата наблюдения КД	Положение КД на диске Солнца	Связь КД с ВСП	Дата пересечения Землей середины фронта ВСП
1	2	3	4	5
1	25.10.01	Ю	–	
2	25.10.01	В	–	
3	27.10.01	С – В	–	
4	29.10.01	С – В	–	
5	07.12.01	З	–	
6	06.02.02	З	+	06.02.02
7	07.02.02	З	+	06.02.02
8	15.05.02	С – В	–	
9	16.05.02	С – З	–	
10	23.05.02	З	+	27.05.02
11	27.05.02	С – В	+	?
12	29.05.02	С	+	02–03.06.02
13	29.05.02	З	+	?
14	10.06.02	Ц	–	
15	16.06.02	Ц	–	
16	23.06.02	З	+	23.06.02
17	25.06.02	Ц	–	
18	28.06.02	З	–	
19	29.06.02	Ю	+	30.06–01.07.02
20	01.09.02	С – З	–	
21	02.09.02	Ю – З	+	04.09.02
22	21.09.02	В	–	
23	23.09.02	Ц	–	
24	03.10.02	Ц	–	
25	03.10.02	З	–	
26	13.11.02	В	–	
27	21.11.02	Ю – В	+	27–28.11.02
28	12.12.02	Ц	–	
29	16.12.02	З	–	

поля, вершины петель которых удалены от поверхности Солнца на относительно большие расстояния. Именно сильная вытянутость магнитных петель делает “замкнутые” КД похожими на “открытые” КД по другим параметрам: пониженной плотности плазмы и, как следствие, повышенной яркости при измерениях в инфракрасной линии и пониженной яркости при измерении в линиях крайнего ультрафиолета.

Еще раз подчеркнем, что результаты нашей работы достаточно убедительно показывают, что существуют два типа КД – “открытые” и “замкнутые”. Но вопрос о том, какова в действительности доля “замкнутых” КД требует дальнейших исследований.

Выражаем благодарность NSO/Kitt Peak за возможность использовать данные (измерения фотосферного магнитного поля), полученные в этой обсерватории в кооперации с NSF/NOAO, NASA/GSFC и NOAA/SEL.

Работа выполнена при поддержке гранта № Ф7/482 – 2001 ГФФИ МОН Украины и Украинской Астрономической Ассоциации. А также эта работа частично выполнена при поддержке правительственного гранта финансовой поддержки ведущих научных школ РФ № НШ 733.2003.2 и программой Минпромнауки РФ “Астрономия” № 1105; гранта РФФИ 03-07-90087.

## Литература

- Бугаенко О.И., Гречнев В.В., Жигалкин Р.К. и др. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2004. С. 102.
- Бугаенко О.И., Житник И.А., Игнатъев А.П. и др. // Изв. Крымской Астрофиз. Обсерв. 2004а. С. 115.
- Бугаенко О.И., Житник И.А., Игнатъев А.П. и др. // Изв. Крымской Астрофиз. Обсерв. 2004б. С. 128.
- Болин (Bohlin, J.D., and N.R. Sheeley,) Jr. // Extreme ultraviolet observations of coronal holes. *Solar Physics*. 1978. V. 56. P. 125.
- Зиркер (Zirker, J.) (Ed.) // *Coronal Holes and High-Speed Wind Streams*, Colorado Associated University Press, Boulder, Colo. 1977.
- Зирин (Zirin, H.) // *The Sun*, Cambridge University Press, New York, 1988. P. 259.
- Еселевич (Eselevich V.G., Fainshtein V.G.) // Influence of sunspot magnetic fields upon the velocity of plasma outflow from coronal holes, *Planet Space Sci*. 1989. 37. N. 9. P. 1027.
- Еселевич (Eselevich V.G., Kaigorodov A.P., Fainshtein V.G.) // Some peculiarities of solar plasma flows from coronal holes. *Planet Space Sci*. 1990. 38. P. 459.
- Еселевич (Eselevich V.G., Fainshtein V.G.) // On the existence of the heliospheric current sheet without a neutral line (HCS without NL), *Planet. Space Sci*. 1992. 40. P. 105.
- Еселевич (Eselevich V.G., Fainshtein V.G., and Rudenko G.V.) // Study of the structure of streamer belts and chains in the solar corona, *Solar Phys*. 1999. 188. P. 277.
- Еселевич (Eselevich V.G. and Eselevich M.V.) // Study of the nonradial directional property of the rays of the streamer belt and chains in the solar corona, *Solar Physics*. 2002. 208. P. 5.
- Калер (S.W. Kahler, J.M. Davis, J.M. Harvey) // Comparison of coronal holes observed in soft X-ray and HeI 10830 Å spectrograms, *Solar Phys*. 1983. 87. P. 47.
- Левин (Levine R.H.) // Open magnetic fields and the solar cycle. I.: Photospheric Sources of Open Magnetic Flux. *Solar Phys*. 1982. 79. P. 203.
- Маланушенко Е.В., Степанян Н.Н. (Malanushenko E.V., Stepanian N.N.) // IV Russ. Symp. "Mathematical Model of the Sun–Earth Environment", eds. Kropotkin, A.P., Antonova A.E., Veselovsky I.S. Moscow: MSU. 1996. P. 41.
- Маланушенко Е.В., Степанян Н.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2001. Т. 97. С. 69.
- МакИнтош (P.S. McIntosh, A.S. Krieger, J.T. Nolte and G. Vaiana) // Association of X-ray arches with chromospheric neutral lines, *Solar Phys*. 1976. 49. P. 57.
- МакКомас (D.J. McComas, J.T. Gosling, J.L. Phillips) // G. Interplanetary magnetic flux – Measurement and balance, *Geophys. Res*. 1992. 97. P. 171.
- Нольте (J.T. Nolte, A.S. Krieger, A.F. Timothy, R.E. Gold, E.C. Roelof, G. Vaiana, A.J. Lazarus, J.D. Sullivan, P.S. McIntosh,) // Coronal holes as sources of solar wind. *Solar Phys*. 1976. V. 46. P. 303.
- Ораевский В.Н., Собельман И.И. // Комплексные исследования активности Солнца на спутнике КОРОНАС-Ф. Письма в Астрон. журнал. 2002. Т. 28. N. 6. С. 457.
- Пнейман (G.W. Pneuman, S.F. Hansen, and R.T. Hansen) // The reality of potential magnetic fields in the solar corona, *Solar Phys*. 1978. 59. P. 313.
- Руденко (Rudenko G.V.) // Extrapolation of the solar magnetic field within the potential– field approximation from full–disk magnetograms. *Solar Phys*. 2001. V. 198. P. 5.
- Степанян Н.Н., Маланушенко Е.В. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2001. Т. 97. С. 76.
- Степанян Н.Н. и др. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2000. Т. 96. С. 194.
- Степанян Н.Н., Малащук В.М. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2002. Т. 98. С. 8.
- Суес (S.T. Suess, A.K. Richter, C.R. Winge, S.F. Nerney) // Solar polar coronal hole – A mathematical simulation, *Astrophys. J*. 1977. 217. P. 296.
- Шилли (N.R. Sheeley, Jr., J.W. Harvey) // Coronal holes, Solar wind streams, and geomagnetic disturbances during 1978 and 1979, *Solar Phys*. 1981. 70. P. 237.
- Файнштейн В.Г., Манженко А.А. // Конфигурация пояса корональных стримеров по данным LASCO/SOHO и расчетам магнитного поля в короне: сравнительный анализ. В сб. "Солнечно-

- земная физика”, 2004. Вып. 4. С. 33.
- Файнштейн В.Г., Еселевич В.Г., Руденко Г.В. // Методы прогноза космической погоды по характеристикам солнечных магнитных полей. В сб. “Солнечно-земная физика”. 2004. (в печати).
- Файнштейн (Fainshtein V.G., Khotilovich A.V., and Rudenko G.V.) // Some properties of solar magnetic fields as deduced from NSO/KP data and calculations, Solar Phys. 2003. 216. P. 5.
- Хадсон (H.S. Hudson) // Coronal holes as seen in soft X-rays by Yohkoh, In: Proc. SOHO 11 Symposium, “From Solar Min to Max: Half a Solar Cycle with SOHO”, Davos, Switzerland, 11–15 March 2002 (ESA SP-508, June 2002). 2002. P. 341.