

УДК 523.947+523.62-726

СВЯЗЬ КОНТРАСТА КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР С ХАРАКТЕРИСТИКАМИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

© 2009 г. В. Н. Обридко¹, Б. Д. Шельтинг¹, И. М. Лившиц¹, А. Б. Аскеров²

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
Троицк Московской обл., Россия

²Шемахинская астрофизическая обсерватория Национальной академии
наук Азербайджана, пос. им. Ю. Мамедалиева, Азербайджан

Поступила в редакцию 15.03.2009 г.; принята в печать 07.04.2009 г.

Показано, что контраст корональных дыр, в той же мере как их площадь, определяет скорость связанных с ними потоков солнечного ветра. Проанализировано более 400 снимков в канале $\lambda 284 \text{ \AA}$. Временной интервал покрывает около 1500 дней на нисходящей ветви 23-го цикла с 2002 по 2006 гг. Для этого интервала изучены все корональные дыры, не совпадавшие с корональными выбросами масс. Проведено также сопоставление с другими характеристиками солнечного ветра (плотность, температура, магнитное поле). Получены относительно высокие значения коэффициентов корреляции со скоростью (0.70–0.89), особенно в периоды умеренной активности, так что данный метод может быть использован для ежедневного прогноза. Оценка яркости корональных дыр по отношению к средней яркости диска в канале $\lambda 284 \text{ \AA}$ составляет около 25%.

PACS: 96.50.Ci, 96.60.ps, 96.60.Vg

1. ВВЕДЕНИЕ

Вскоре после открытия корональных дыр (КД) на Солнце стала ясна их связь с высокоскоростными потоками (ВСП) солнечного ветра. Нолт и др. [1] установили прямую зависимость между площадью КД и скоростью истекающего из нее солнечного ветра. Позднее связь КД с ВСП устанавливалась неоднократно [2–6]. КД наблюдаются в основном в рентгеновском, ультрафиолетовом и микроволновом диапазонах как темные образования на солнечном диске [6, 7].

Есть некоторые физические основания полагать, что яркость (контраст) КД должна коррелировать с некоторыми характеристиками связанного с ней ВСП, в первую очередь со скоростью. Это предположение было высказано около 10 лет назад в работах [8, 9] и с тех пор не проверялось. Другая связь, а именно корреляция скорости с площадью КД, проверялась неоднократно [10–13]. В частности, Роббинс и др. [11] показали, что связь скорости солнечного ветра с площадью КД ухудшается в периоды высокой солнечной активности. Этого и можно было ожидать, поскольку корональные выбросы массы (КВМ), не связанные прямо с КД, дают резкие всплески скорости, которые нарушают корреляцию с площадью КД. Кроме того, в периоды высокой солнечной активности увеличивается

роль замкнутых силовых линий, которые дают особо медленные потоки. Врснак и др. [12, 13] изучали связь скорости солнечного ветра с площадью КД в относительно спокойный период с января по май 2005 г., и они получили довольно высокий коэффициент корреляции 0.62 при транспортном времени 4 дня.

Неоднократно изучалась связь между магнитным полем в КД и скоростью солнечного ветра. Так, например, в работе [14] была получена довольно высокая корреляция между характеристиками магнитного поля на Солнце и скоростью солнечного ветра. Прогноз скорости солнечного ветра регулярно выполняется несколькими центрами на основе потенциальной экстраполяции наблюдаемого на уровне фотосферы магнитного поля. Используя одну из этих моделей, а именно модифицированную модель переноса потока [15, 16], Ардж и Пиццо [17] изучили трехлетний период, центр которого располагался вблизи минимума предыдущего цикла (май 1996 г.), и получили коэффициент корреляции ~ 0.4 . Позднее модель была улучшена, и теперь она учитывает расстояние до ближайшей КД по-прежнему методом потенциальной аппроксимации [18, 19]. Результаты этих расчетов доступны на интернет-сайте <http://solar.sec.noaa.gov/ws/>.

Однако поскольку яркость (контраст) КД определяется расходимость силовых линий и эта же расходимость определяет скорость ВСП, физически ожидаема связь контраста КД со скоростью ВСП, и она должна быть разумным параметром для прогнозирования геофизических проявлений. Сегодня очевидно, что КД представляют собой области открытых силовых линий, через которые эффективно истекает плазма из короны в солнечный ветер. Это приводит к опустошению короны в области КД и соответственно к понижению яркости в этих областях. Отличия в яркости между КД и обычными невозмущенными областями солнечной короны являются следствием различия как в механизмах нагрева, так и механизмах потери энергии [20–25]. При этом, если в обычной короне преобладают потери на теплопроводность, в КД, в отличие от этого, основные потери определяются потоком солнечного ветра [26]. Таким образом, сам факт потемнения в КД несомненно связан с истечением из них ВСП. К такому выводу пришли и Бадалян и Обридко [27, 28].

Многочисленные источники неопределенности, которые мы обсудим ниже, до сих пор препятствовали прямому применению высказанной нами ранее [8, 9] гипотезы о связи яркости КД и скорости солнечного ветра. Яркость (“чернота”) КД использовалась как дополнительный качественный фактор при прогнозировании в Центре прогнозов ИЗМИРАН. Однако проверить эту связь и получить количественные характеристики довольно трудно.

Недавно появилась работа [29], в которой используется яркость КД в линии $\lambda 284 \text{ \AA}$ для расчета скорости солнечного ветра у Земли. В этой работе получены довольно высокие коэффициенты корреляции для относительно короткого временного интервала с 21 ноября по 26 декабря 2003 г. Следует, однако, заметить, что в этой работе используется не непосредственно яркость КД, а прогностический индекс, представляющий собой усредненную внутри фиксированного круга в центре Солнца величину, обратную сигналу в каждом из пикселей. Эта величина может сильно отличаться от средней яркости. Ее физическая интерпретация довольно затруднительна, поскольку все механизмы нагрева и энергопереноса соответствуют яркости, а не ее обратной величине. Кроме того, при усреднении всех обратных значений внутри фиксированного круга в расчетный индекс могут войти и нестационарные процессы типа вспышек и КВМ, которые сильно исказят средние величины. Впрочем на малых временных интервалах в связи с относительно медленным изменением параметров КД все применяемые индексы (площадь, яркость, обратная яркость) дадут одинаково хорошие результаты).

В связи со сказанным, мы предпочли пойти прямым путем: использовать непосредственно яркости пикселей на достаточно большом временном интервале и попытаться проанализировать все возможные источники неопределенностей как с точки зрения физического анализа яркости КД, так и с точки зрения их использования для прогноза. Для контроля нами были проведены вычисления для нескольких периодов на Солнце (в том числе и для тех, которые анализировались в работах [12, 13, 29]).

2. ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Трудности в работе связаны с тем, что многие характеристики и даже термины плохо определены. К сожалению, до сих пор плохо определены количественные критерии для выделения КД из наблюдений [30].

В частности, не ясно, где граница КД, в каких длинах волн ее следует изучать, как ее отличать от явлений типа волокна, как определить контраст, что такое невозмущенная область, как учесть возможную деградацию приемников излучения. Не ясно, надо ли раздельно изучать полярные и экваториальные дыры.

На рис. 1 показана в качестве примера ситуация, наблюдавшаяся на диске Солнца 28 ноября 2002 г. в канале $\lambda 284 \text{ \AA}$.

На диске в этот день наблюдается сложное образование типа КД. Очертить его границы чрезвычайно трудно. При этом контуры оказываются многосвязными. Внутренняя структура дыры чрезвычайно неоднородна, поэтому не ясно, следует ли искать минимальную яркость, среднюю яркость или полный интеграл дефицита яркости (по образной терминологии, “максимальную глубину каньона”, “среднюю глубину каньона” или “объем каньона”). При сопоставлении с характеристиками солнечного ветра возникают дополнительные трудности отождествления эффекта КД и исключения других процессов, в первую очередь КВМ. Поэтому решение задачи осуществляется поэтапно.

Определение контраста вполне соответствует методике, общепринятой при фотометрии спектральных линий или контраста солнечных пятен. Для вычисления мы должны иметь измерение фона или вуали (в данном случае за пределами диска), измерение яркости собственно в КД и изменение невозмущенной области (эквивалентно непрерывному спектру в спектральной фотометрии). При этом заранее неясно, следует ли относить дефицит к средней яркости диска, в которую входят отдельные очень яркие образования, или к непосредственным окрестностям КД. Заметим также, что,

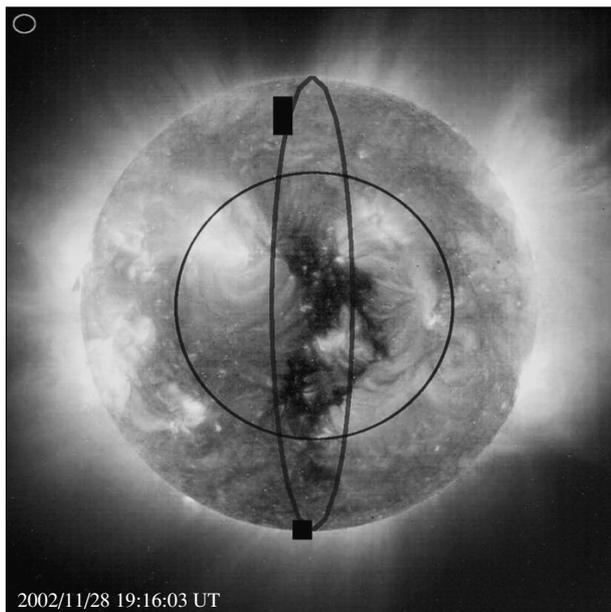


Рис. 1. Корональная дыра, наблюдавшаяся в канале $\lambda 284 \text{ \AA}$ 28 ноября 2002 г. Место измерения фона показано на рисунке кружком в левом верхнем углу (см. п. 2.2). Указаны границы сферического сектора и круга радиусом $0.6 R_{\odot}$.

хотя на снимках КД кажутся резко очерченными, реальный контраст дыр не очень велик, и на самом деле он гораздо ниже, чем, скажем, в солнечных пятнах.

Есть еще одна проблема, которую следует решить. Можно сравнивать яркость КД со скоростью солнечного ветра только в те дни, когда КД реально проходит через диск. С другой стороны, можно имитировать работу ежедневного прогноза, вычисляя прогностические индексы каждый день, независимо от того, наблюдается в этот день КД или нет. При этом впрочем, естественно, необходимо исключать дни, в которые наблюдались КВМ, поскольку физически эти потоки определяются совершенно разными механизмами.

При сопоставлении с характеристиками солнечного ветра возникает еще один источник неопределенности — величина транспортного времени. Заметим при этом, что оптимальное транспортное время может быть различно для различных характеристик солнечного ветра.

2.1. Предварительный просмотр материала

КД как темные образования наблюдаются, в основном, в рентгеновском и ультрафиолетовом излучениях [6, 7] на снимках SOHO EIT и STEREO EUVI.

Полярные дыры в период максимума отсутствуют, но зато в этот период больше экваториальных КД, с которыми легче сопоставить увеличения скорости солнечного ветра. В то же время в этот

период трудно найти невозмущенную область. Кроме того, в это время высока вероятность того, что увеличение скорости связано не с КД, а с КВМ.

С другой стороны, в период минимума экваториальные КД практически отсутствуют, а полярные КД наоборот присутствуют всегда. Определение невозмущенной зоны в минимуме легче. Вероятно именно поэтому для минимума используются просто ежедневные наблюдения и вычисляется суммарная ежедневная площадь участков на Солнце ниже некоторого предела.

Мы для начала остановились на 1999 г. Был просмотрен материал по наблюдениям на SOHO за 1999 г. на длинах волн 171 \AA ($T \sim 1.3 \times 10^4 \text{ K}$), 195 \AA ($T \sim 1.6 \times 10^6 \text{ K}$), 284 \AA ($T \sim 2.0 \times 10^6 \text{ K}$), 304 \AA ($T \sim 8.0 \times 10^4 \text{ K}$), наблюдения YONKON в рентгеновском диапазоне, зарисовки КД по наблюдениям в линии 10830 \AA приведенные в «Solar-Geophysical Data», расчеты открытых магнитных полей по оригинальной программе с использованием наблюдений в Стенфорде, сводный файл наблюдений скорости солнечного ветра у Земли. Были отобраны 4 КД, прохождение которых через центральный меридиан Солнца можно было с некоторой точностью сопоставить с увеличением скорости СВ.

Оказалось, что для поставленной задачи оптимальной является линия 284 \AA , в связи с чем отметим следующее:

1. Определение контраста вполне соответствует методике, общепринятой при фотометрии спектральных линий или контраста солнечных пятен.

Для вычисления мы должны иметь измерение фона или вуали. Просмотр данных за 2005 г. показал, что значение фона практически не меняется в течение года и определяется с погрешностью меньше 0.2%.

2. Яркость невозмущенной области определяется крайне неопределенно, и использовать ее трудно.

3. В качестве условной границы КД или (что в данном случае одно и то же) уровня невозмущенной области в непосредственных окрестностях КД было принято значение 1.03 от фона. Предварительные просчеты показали, что это не влияет сильно на результаты, поскольку на границе КД яркость меняется очень быстро. Полученные значения индексов несколько меняются при использовании в качестве границы значений 1.035 и 1.04 от фона, но корреляция с параметрами солнечного ветра меняется незначительно.

4. Все расчеты для каждого дня проводились для всего диска, для сферического сектора ± 1 день от центрального меридиана (т.е. $\pm 13.3^\circ$ в гелиографических координатах) и для круга радиусом 0.6 радиуса Солнца.

5. В настоящей работе мы не вводили поправку за проекцию, и все площади вычислялись как число пикселей.

6. Дефекты типа тех, что видны на рис. 1, устранялись тем, что в этих пикселах принималось среднее по диску значение. На усредненные характеристики контрастов это фактически не влияло.

2.2. Используемые данные и расчетные индексы

В дальнейшем использовались данные наблюдений SOHO в fits-формате 1024×1024 из сайта http://sohowww.nascom.nasa.gov/cgi-bin/summary_query_form. Список КД был взят из сайта http://www.solen.info/solar/coronal_holes.html ("Coronal hole history (since late October 2002)"). Сопоставление проводилось со среднесуточными значениями скорости V , магнитного поля B , плотности n и температуры T при значениях транспортного времени 2, 3, 4 дня. Эти данные брались из сайта <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/>.

Для каждого дня вычислялись следующие величины:

Общие характеристики

f_{0p} — минимальная яркость на снимке за пределами диска Солнца

$S1$ — сумма яркостей пикселей по всему диску

$d1$ — полное число пикселей на диске

$ss1$ — средняя яркость пиксела на диске ($ss1 = S1/d1$)

Центральные характеристики, которые вычислялись в двух вариантах:

(а) внутри сферического сектора ± 1 день от центрального меридиана
и (б) внутри круга радиусом $0.6R_0$

$S2$ — сумма яркостей пикселей

$d2$ — число пикселей

$ss2$ — средняя яркость ($ss2 = S2/d2$)

Характеристики КД, которые также вычислялись в двух вариантах:

(а) внутри сферического сектора ± 1 день от центрального меридиана
и (б) внутри круга радиусом $0.6R_0$

sk — сумма яркостей пикселей, которые удовлетворяют условию "яркость ниже $\bar{i} * f_{0p}$ ". В качестве величины \bar{i} , определяющей собой яркостную границу КД, было выбрано значение $\bar{i} = 1.03$

dkd — число пикселей, которые удовлетворяют условию "яркость ниже $\bar{i} * f_{0p}$ "

skd — средняя яркость пикселей, которые тоже удовлетворяют условию "яркость ниже $\bar{i} * f_{0p}$ "

ou — минимальная яркость среди точек, относенных к КД

Индексы

$cn1 = (ss - skd) * dkd$ — объем каньона при условии, что невозмущенный уровень равен средней по диску яркости

ou — минимальная яркость среди точек, относенных к КД

$A = dkd/d2$ — относительная площадь КД внутри центрального сектора. Соответствует индексу, использованному в [12, 13]

$cn2 = (ss2 - skd) * dkd$ — объем каньона при условии, что невозмущенный уровень равен средней внутри центрального сектора яркости

$cn3 = (1.03 * f_{0p} - skd) * dkd$ — объем каньона при условии, что невозмущенный уровень равен $1.03 * f_{0p}$

$dcp = 1.03 * f_{0p} - skd$ — средняя глубина каньона при условии, что невозмущенный уровень равен $1.03 * f_{0p}$

$dmax = 1.03 * f_{0p} - ou$ — максимальная глубина каньона при условии, что невозмущенный уровень равен $1.03 * f_{0p}$

Некоторые из перечисленных характеристик (индексов) указаны в качестве примера на одномерном разрезе через центр диска 28 ноября 2002 г. (рис. 2).

Величины R_0 , X_0 , Y_0 , определяющие собой радиус и координаты центра Солнца в пикселах, в этот день взяты из шапки к файлу (HEADER), что

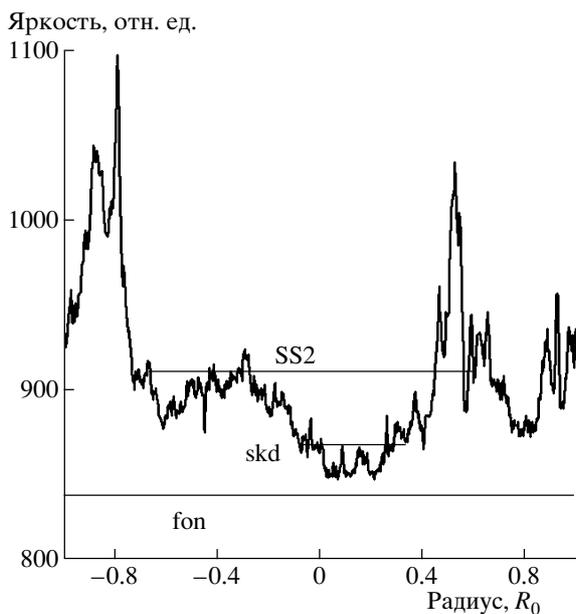


Рис. 2. Одномерное центральное сечение яркости диска 28 ноября 2002 г. Указаны некоторые используемые индексы.

обеспечивает учет эксцентриситета орбиты Земли. Фиксировались также размер пиксела в секундах и экспозиция с учетом времени действия затвора. Однако ввиду малости изменений двух последних величин ($<0.5\%$) поправки за них не вводились.

Оценка величины контраста, как уже говорилось выше, довольно затруднительна, поскольку не ясно, к чему его относить. Если относить значения к фону, как это сделано ниже на рис. 3, то получаются довольно низкие значения в пределах 0.003–0.010. Однако сам фон на снимках очень высок — в единицах отсчетов на пиксел он составляет 830–840 ед. Превышение средней яркости на диске над фоном без учета проекции составляет 70 ед. в 2002 г. и постепенно падает до 50 ед. в 2007 г. Если принять значения фона за референтный уровень и относить значения dsp к среднему превышению на диске над этим уровнем, получаем среднюю относительную яркость КД около 25%.

3. СОПОСТАВЛЕНИЕ КОНТРАСТА КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР С ХАРАКТЕРИСТИКАМИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

При выполнении данной работы из файла “Coronal hole history (since late October 2002)” было выбрано 138 КД за период 2002–2006 гг., т.е. все дыры, в которых возрастание скорости солнечного ветра вблизи Земли не было связано с КВМ. В табл. 1 дается коэффициент корреляции характеристик солнечного ветра с яркостью КД.

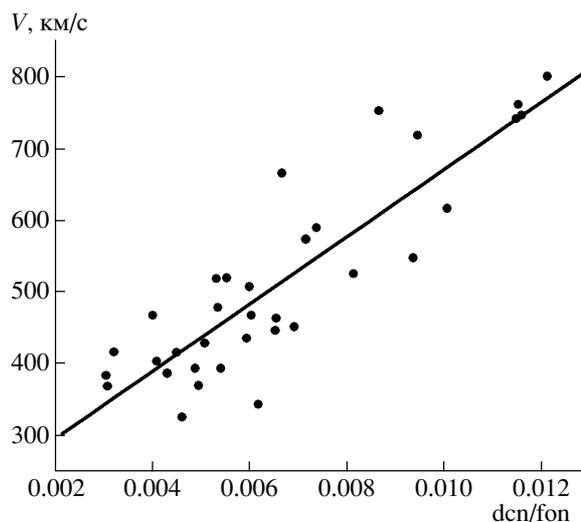


Рис. 3. Корреляция среднего потемнения dsp и скорости солнечного ветра в период с 21 ноября по 26 декабря 2003 г.

Выводы при сравнении этих пяти индексов для КД с 4 характеристиками солнечного ветра состоят в следующем.

1. Наилучшим при расчете скорости при транспортном времени 4 дня является dcn , т.е. средний дефицит.

2. Эти параметры не так хороши для расчетов поля и плотности. Можно только заметить, что все они дают антикорреляцию с плотностью на 4 день, т.е. в момент наибольшей скорости.

3. Довольно высока и положительная корреляция dsp с температурой при сдвиге 2–3 дня.

4. Рассчитывать магнитное поле по яркости КД не очень перспективно. По-видимому, более перспективным являются традиционные методы с использованием данных магнитографов и расчетом поля на поверхности источника. Эта методика была реализована в частности в работе [14].

Для контроля влияния полярных КД и учета влияния выбранного удаления от центрального меридиана были проведены расчеты всех упомянутых выше индексов внутри круга радиусом 0.6 радиуса Солнца для тех же 138 КД. Результаты показаны в табл. 2.

Из сравнения табл. 1 и 2 видно, что во втором случае коэффициенты корреляции исследуемых индексов со скоростью солнечного ветра с учетом транспортного времени $\delta t = 3-4$ дня несколько увеличились. Возможно, что в этом проявляется исключение во втором случае из анализа полярных дыр. Впрочем, это увеличение лишь немногим превышает погрешность при вычислении коэффициента корреляции, которая равна 0.04. Тем не менее, при сопоставлении наблюдаемой на диске КД со скоростью солнечного ветра предпочтительнее пользоваться вторым методом.

Таблица 1. Корреляция индексов КД в центральном секторе и характеристик солнечного ветра

Индекс	$\delta t = 2$ дня				$\delta t = 3$ дня				$\delta t = 4$ дня			
	<i>B</i>	<i>V</i>	<i>n</i>	<i>T</i>	<i>B</i>	<i>V</i>	<i>n</i>	<i>T</i>	<i>B</i>	<i>V</i>	<i>n</i>	<i>T</i>
Коэффициент корреляции												
A	0.28	0.35	0.05	0.40	0.00	0.48	-0.20	0.37	0.25	0.48	-0.33	0.22
cn2	0.16	0.33	-0.05	0.33	0.21	0.30	-0.14	0.22	0.12	0.26	-0.17	0.13
cn3	0.22	0.41	-0.05	0.42	0.00	0.49	-0.22	0.35	0.18	0.47	-0.29	0.22
dcp	0.36	0.49	-0.06	0.50	0.24	0.62	-0.29	0.51	0.00	0.63	-0.30	0.37
dmax	0.24	0.44	-0.10	0.40	0.25	0.47	-0.23	0.39	0.05	0.51	-0.28	0.36

Таблица 2. Корреляция индексов КД в центральном круге и характеристик солнечного ветра

Индекс	$\delta t = 2$ дня				$\delta t = 3$ дня				$\delta t = 4$ дня			
	<i>B</i>	<i>V</i>	<i>n</i>	<i>T</i>	<i>B</i>	<i>V</i>	<i>n</i>	<i>T</i>	<i>B</i>	<i>V</i>	<i>n</i>	<i>T</i>
Коэффициент корреляции												
A	0.29	0.43	0.00	0.52	0.00	0.54	-0.23	0.41	0.26	0.54	-0.36	0.30
cn2	0.26	0.25	-0.12	0.33	0.20	0.28	-0.11	0.24	0.10	0.30	-0.24	0.20
cn3	0.32	0.59	-0.13	0.63	0.00	0.65	-0.32	0.48	0.18	0.65	-0.39	0.40
dcp	0.36	0.62	-0.16	0.60	0.24	0.67	-0.33	0.54	0.00	0.68	-0.37	0.42
dmax	0.23	0.53	-0.18	0.45	0.23	0.51	-0.26	0.40	0.00	0.53	-0.35	0.39

4. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ПРИ ЕЖЕДНЕВНОМ ПРОГНОЗЕ

На первый взгляд задача расчета характеристик солнечного ветра при ежедневном прогнозе не отличается от прямого сопоставления дефицита яркости КД и характеристик солнечного ветра, изложенного в предыдущем разделе. Однако есть две особенности, которые несколько меняют ситуацию.

1. При ежедневном прогнозе в массив данных входят дни, когда на Солнце не было КД. Это означает, что общий динамический диапазон данных расширяется.

2. В какие-то дни кроме КД на Солнце происходят также и КВМ, которые резко меняют диапазон скоростей. Как будет видно из дальнейшего, в эти дни связь яркости со скоростью солнечного ветра полностью нарушается.

Сначала для анализа был выбран период с 20 января по 5 июня 2005 г., т.е. порядковые дни года 20–125, за вычетом порядковых дней года 70–90, где нет данных по $\lambda 284 \text{ \AA}$. В этот период отсутствовали КВМ типа “гало”, поэтому можно считать, что солнечный ветер был невозмущенным и вариации его характеристик определяются именно КД. Первая часть этого интервала совпадает с периодом, анализированном в работах [12, 13].

В табл. 3 и 4 даны коэффициенты корреляции рассчитанных индексов с *B*, *V*, *n*, *T* и A_p при

разных значениях транспортного времени при ежедневном прогнозе. Как и выше, табл. 3 соответствует прогнозу с использованием сферического сектора ± 1 день от центрального меридиана, а табл. 4 построена для круга радиусом 0.6 радиуса Солнца.

Видно, что и здесь параметр dcp, несомненно, лучший. Наивысший коэффициент корреляции достигается с *V* на 4-ый день, с *B* на 2-ой день, с *n* на 1-ый день, с *T* на 3-ий день.

Заметим, что есть ряд отличий между табл. 1–2 и табл. 3–4.

1. Если при анализе связи КД с характеристиками солнечного ветра несколько более высокие значения коэффициентов корреляции достигались при использовании данных внутри круга радиусом 0.6 радиуса Солнца (т.е. в экваториальной зоне, что соответствовало расстоянию ± 3 дня от центрального меридиана ($\pm 37^\circ$) и полярная зона исключалась), то при ежедневном прогнозе несколько более высокие значения получаются при использовании сферического сектора ± 1 день от центрального меридиана.

2. Если при сопоставлении с КД отрицательная корреляция с плотностью устанавливалась уже при небольших значениях транспортного времени, то во втором случае отрицательная корреляция с *n* наблюдается только при сдвиге 4 дня.

3. Обнаружились довольно высокие значения корреляции с *T* при $\delta t = 3$.

4. Что касается корреляции с индексом геомагнитной активности A_p , то она везде невысока.

Таблица 3. Корреляция ежедневных значений дефицита яркости в центральном секторе и характеристик солнечного ветра

Индекс	$\delta t = 2$ дня					$\delta t = 3$ дня					$\delta t = 4$ дня				
	<i>B</i>	<i>V</i>	<i>n</i>	<i>T</i>	<i>A_p</i>	<i>B</i>	<i>V</i>	<i>n</i>	<i>T</i>	<i>A_p</i>	<i>B</i>	<i>V</i>	<i>n</i>	<i>T</i>	<i>A_p</i>
	Коэффициент корреляции														
A	0.29	0.16	0.27	0.30	0.28	0.25	0.49	0.07	0.46	0.31	0.04	0.67	-0.19	0.51	0.32
cn2	0.48	0.04	0.27	0.22	0.16	0.31	0.18	0.04	0.35	0.17	0.14	0.26	-0.13	0.24	0.13
cn3	0.37	0.04	0.33	0.31	0.33	0.32	0.52	0.07	0.53	0.39	0.05	0.71	-0.24	0.052	0.33
dcp	0.59	0.05	0.51	0.22	0.0	0.53	0.47	0.14	0.63	0.54	0.32	0.74	-0.21	0.55	0.37
dmax	0.47	0.0	0.41	0.17	0.0	0.46	0.44	0.11	0.54	0.40	0.24	0.66	-0.21	0.54	0.31

Таблица 4. Корреляция индексов КД в центральном круге и характеристик солнечного ветра

Индекс	$\delta t = 2$ дня				$\delta t = 3$ дня				$\delta t = 4$ дня			
	<i>B</i>	<i>V</i>	<i>n</i>	<i>T</i>	<i>B</i>	<i>V</i>	<i>n</i>	<i>T</i>	<i>B</i>	<i>V</i>	<i>n</i>	<i>T</i>
	Коэффициент корреляции											
A	0.27	0.17	0.26	0.29	0.23	0.47	0.00	0.45	0.00	0.62	-0.20	0.47
cn2	0.39	0.12	0.18	0.36	0.24	0.24	-0.08	0.33	0.06	0.22	-0.26	0.24
cn3	0.36	0.14	0.32	0.31	0.31	0.50	0.03	0.50	0.06	0.68	-0.24	0.50
dcp	0.59	0.03	0.49	0.27	0.55	0.48	0.10	0.60	0.26	0.68	-0.30	0.49
dmax	0.45	0.10	0.36	28	0.37	0.45	0.29	0.51	0.04	0.63	-0.28	0.52

Несомненно, для правильного расчета этого индекса необходимо учитывать данные о магнитном поле на Солнце в [14].

Наконец, был выбран период с 21 ноября по 26 декабря 2003 г., также лишенный КВМ. Именно этот короткий период был использован в работе [29]. Корреляции средней яркости со скоростью (временной сдвиг 4 дня) совпадают в обеих работах и составляют 0.88.

На рис. 3 показана диаграмма связи среднего дефицита dcp и скорости солнечного ветра за этот период. На рисунке по оси абсцисс нанесено значение dcp/fo_p, но на таком коротком интервале это не влияет на корреляцию. Здесь коэффициент корреляции составляет 0.89 и совпадает с коэффициентом корреляции, который получили на этом временном интервале Луо и др. [29].

На рис. 4 показаны измеренная и вычисленная скорость на этом временном интервале.

Таким образом, методика расчета скорости спокойного солнечного ветра исходя из дефицита яркости в КД полностью себя оправдывает в периоды отсутствия возмущающего действия КВМ.

Следует подчеркнуть одну важную особенность. Независимо от коэффициента корреляции все 20 повышений скорости ≥ 500 км/с, которые наблюдались в течение этих периодов, хорошо описываются нашими расчетными кривыми. Среднее отклонение рассчитанных значений от измеренных меньше 50 км/с.

Следует однако отметить, что, как и ожидалось, КВМ приводят к непрогнозируемым выбросам скорости, что естественно снижает коэффициент корреляции. Такая ситуация наблюдалась в середине 2005 г., когда при сопоставлении вычисленной и измеренной скорости наблюдалось 6 непредсказанных выбросов скорости. Однако все они совпали с наблюдавшимися на Солнце КВМ типа гало. В конце года, когда не было КВМ, высокая корреляция измеренных и предвычисленных скоростей восстановилась.

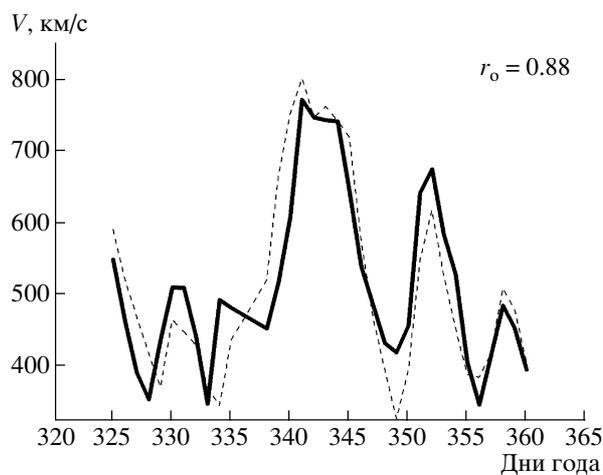


Рис. 4. Измеренные (штриховая кривая) и вычисленные (сплошная кривая) значения скорости в период с 21 ноября по 26 декабря 2003 г.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Таким образом, гипотеза о прямой корреляции между контрастом КД и скоростью связанных с ними потоков солнечного ветра подтвердилась для всех дней 2005 г., когда были наблюдения в канале $\lambda 284 \text{ \AA}$ (в целом 270 дней), для 35 дней в 2003 г. и для 138 отдельных наблюдений КД с 2002 по 2006 гг., т.е. всего для 443 отдельных сопоставлений. Длина временного интервала в нашем анализе составила более 1500 дней на нисходящей фазе 23-го цикла. Были проанализированы все не совпадавшие с КВМ КД, наблюдавшиеся в этот период. Оказалось, что при транспортном времени 4 дня коэффициент корреляции в среднем составляет около 0.70, а в отдельные периоды достигает 0.88. Все зарегистрированные за это время увеличения скорости более 500 км/с были успешно предсказаны. Среднее отличие измеренных и вычисленных скоростей меньше 50 км/с. Показано также наличие значимых корреляций и с другими параметрами солнечного ветра, в частности с плотностью и температурой при сдвигах 2–4 дня.

Контраст КД за это время составил в среднем 10%–12%, а максимальный контраст был 33%–40%. При этом наблюдалось падение контраста с приближением к минимуму 23-го цикла с сохранением средней площади.

Показана возможность использования таких индексов для ежедневного прогнозирования. Достоинством концепции является неиспользование при расчете никаких теоретических допущений. В корреляцию входят только непосредственно измеряемые величины. При этом значения коэффициентов корреляции выше, чем в других методах.

Более того, обнаруженная связь является, по существу, независимым экспериментальным подтверждением правильности наших основных предположений о структуре и механизмах нагрева КД.

Мы признательны создателям космического аппарата SOHO за использованные данные с сайта http://sohowww.nascom.nasa.gov/cgi-bin/summary_query_form и авторам сайтов http://www.solen.info/solar/coronal_holes.html (“Coronal hole history (since late October 2002)”) и <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/>. Мы также признательны А.В. Белову и И.М. Чертоку за полезные дискуссии. Работа поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований 08-02-00070.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. T. Nolte, A. S. Krieger, A. F. Timothy, *et al.*, *Solar Phys.* **46**, 303 (1976).
2. J. T. Gosling and V. J. Pizzo, *Space Sci. Rev.* **89**, 21 (1999).
3. J. Zhang, J. Woch, S. K. Solanki, and R. von Steiger, *Geophys. Res. Lett.* **29**, 1236 (2002).
4. J. Zhang, J. Woch, S. K. Solanki, *et al.*, *J. Geophys. Res.* **108**, 1144 (2003).
5. D. J. McComas and H. A. Elliot, *Geophys. Res. Lett.* **29**, 1314 (2002).
6. B. J. I. Bromage, P. K. Browning, and J. R. Clegg, *Space Sci. Rev.* **97**, 13 (2001).
7. S. W. Kahler and H. S. Hudson, *Astrophys. J.* **574**, 467 (2002).
8. V. N. Obridko, in: *Advances in Solar Connection with Interplanetary Phenomena*, Proc. Third SOLTIP Symp., Beijing, China, October 14–18, 1996, eds. X. Feng, F. Wei, M. Dryer (International Academic Publishers, Beijing, 1998), p. 41.
9. V. N. Obridko, V. V. Fomichev, A. F. Kharshiladze, *et al.*, *Astron. and Astrophys. Trans.* **18**, 819 (2000).
10. И. С. Веселовский, И. Г. Персианцев, А. Ю. Русанов, Ю. С. Шугай, *Астрон. вестн.* **40**, 427 (2006).
11. S. Robbins, C. J. Henney, and J. W. Harvey, *Solar Phys.* **233**, 265 (2006).
12. B. Vrsnak, M. Temmer, and A. M. Veronig, *Solar Phys.* **240**, 315 (2007).
13. B. Vrsnak, M. Temmer, and A. M. Veronig, *Solar Phys.* **240**, 331 (2007).
14. A. V. Belov, V. N. Obridko, B. D. Shelting, *Geomagn. Aeron.* **46**, 430 (2006).
15. Y.-M. Wang, N. R. Sheeley, Jr., *Astrophys. J.* **355**, 726 (1990).
16. Y.-M. Wang, N. R. Sheeley, Jr., *Astrophys. J.* **392**, 310 (1992).
17. C. N. Arge, V. J. Pizzo, *J. Geophys. Res.* **105**, 10465 (2000).
18. C. N. Arge, D. Odstrcil, V. J. Pizzo, L. R. Mayer, in: *Solar Wind Ten: Proc. Tenth International Solar Wind Conference*, eds. M. Velli, R. Bruno, F. Malara, B. Bucci (AIP Conf. Proc., New York, 2003), v. 679, p. 190.
19. C. N. Arge, J. G. Luhmann, D. Odstrcil, *et al.*, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* **66**, 1295 (2004).
20. G. W. Cushman and W. A. Rense, *Astrophys. J. (Letters)* **207**, L61 (1976).
21. G. J. Rottman, F. Q. Orrall, and J. A. Klimchuk, *Astrophys. J.* **260**, 326 (1982).
22. F. Q. Orrall, G. J. Rottman, and J. A. Klimchuk, *Astrophys. J. (Letters)* **266**, L65 (1983).
23. S. R. Cranmer, *Coronal Holes*, in: *Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics*, ed. P. Murdin, Institute of Physics Publishing, Bristol, 2001, article 1999.
24. S. R. Cranmer, *COSPAR Coll. Ser.* **13**, 3 (2002).
25. S. R. Cranmer, *Space Sci. Rev.* **101**, 229 (2002).
26. G. L. Withbroe, R. W. Noyes, in: *Annual review of astronomy and astrophysics*, Annual Reviews, Inc., Palo Alto, Calif., 1977, v. 15, p. 363.
27. О. Г. Бадалян, В. Н. Обридко, *Астрон. журн.* **81**, 746 (2004).
28. O. G. Badalyan and V. N. Obridko, *Solar Phys.* **238**, 271 (2007), DOI 10.1007/s11207-006-0214-2.
29. B. Luo, Q. Zhong, S. Liu, J. Gong, *Solar Phys.* **250**, 159 (2008).
30. X. P. Zhao, J. T. Hoeksema, and P. H. Scherrer, *J. Geophys. Res.* **104**, 9735 (1999).