

СВЯЗЬ МЕЖДУ ПЛОЩАДЬЮ ПОЛЯРНЫХ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР И СКОРОСТЬЮ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В МИНИМУМЕ МЕЖДУ 22-м И 23-м СОЛНЕЧНЫМИ ЦИКЛАМИ

RELATION BETWEEN THE AREA OF POLAR CORONAL HOLES AND THE SOLAR WIND SPEED AT A MINIMUM BETWEEN SOLAR CYCLES 22 AND 23

А.В. Борисенко

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
Москва, Россия, sunw77@mail.ru

С.А. Богачёв

Институт космических исследований РАН,
Москва, Россия, bogachev.sergey@gmail.com

A.V. Borisenko

Lebedev Physical Institute RAS,
Moscow, Russia, sunw77@mail.ru

S.A. Bogachev

Space Research Institute RAS,
Moscow, Russia, bogachev.sergey@gmail.com

Аннотация. Мы использовали данные космического телескопа SoHO/EIT и спектрометра VEIS на космическом аппарате Wind, чтобы сравнить скорость солнечного ветра (СВ) около орбиты Земли с изменениями площади полярных корональных дыр (КД) на Солнце в минимуме солнечной активности 1996 г. Мы обнаружили, что в марте 1996 г. скорость СВ коррелировала с площадью южной КД с коэффициентом 0.64. В сентябре и октябре 1996 г. была обнаружена корреляция скорости СВ с площадью северной КД (коэффициенты 0.64 и 0.85 соответственно). Как мы полагаем, это подтверждает, что СВ из полярных КД может проникать в плоскость эклиптики в минимуме солнечной активности. Скорость СВ составила 460–500 км/с — это ниже, чем скорость СВ из экваториальных КД (600–700 км/с).

Ключевые слова: корональные дыры, солнечный ветер, солнечный цикл.

Abstract. We have used data from the space telescope SOHO/EIT and the spectrometer VEIS on the Wind spacecraft to compare the solar wind (SW) speed near Earth's orbit with changes in the area of polar coronal holes (CHs) on the Sun during the 1996 solar activity minimum. We have found that in March 1996 the SW speed correlated with the southern CH area by a factor of 0.64. In September and October 1996, a correlation was revealed between the SW speed and the area of the northern CH (the coefficients are 0.64 and 0.85 respectively). We believe that this confirms the assumption that the solar wind from polar CHs can penetrate into the ecliptic plane at solar minimum. The SW speed was 460–500 km/s, which is lower than that from equatorial CHs (600–700 km/s).

Keywords: coronal holes, solar wind, solar cycle.

ВВЕДЕНИЕ

Корональные дыры (КД) представляют собой крупномасштабные области солнечной короны с открытыми линиями магнитного поля. При наблюдениях Солнца в вакуумной ультрафиолетовой (ВУФ) области спектра (например, в линии 193 Å) КД хорошо различимы на солнечном диске как более темные области, излучение которых ослаблено по сравнению с излучением спокойной короны из-за более низкой плотности плазмы. Впервые КД, вероятно, были описаны в 50-е гг. XX в. Максом Вальдмайером [Waldmeier, 1956], который обнаружил их на изображениях солнечной короны в зеленой оптической линии 5303 Å. В 1970-х гг. в ходе выполнения научных экспериментов на станции Skylab была установлена связь КД с потоками солнечного ветра (СВ). В частности, было показано, что появление крупных КД на низких широтах вблизи центрального меридиана Солнца коррелирует с усилением скорости СВ (например, [Krieger et al., 1973]). Впоследствии влияние низкоширотных (экваториальных) КД на быструю компоненту СВ было многократно подтверждено (см., например, [Nolte et al., 1976; Rotter et al., 2012]).

Помимо низкоширотных КД, на Солнце почти всегда наблюдаются КД еще одного типа — полярные, располагающиеся вблизи магнитных полюсов Солнца. Полярные КД также связаны с открытыми линиями магнитного поля. При этом, если на низких и средних солнечных широтах крупномасштабные области с открытыми линиями поля формируются относительно случайно в результате взаимодействия магнитных полей, то вблизи полюсов открытые линии поля существуют практически всегда. По этой причине полярные КД, как правило, более стабильны, чем КД на низких широтах. Тем не менее влияние полярных КД на скорость СВ около Земли практически не рассматривается из-за их удаленности от плоскости эклиптики.

В ходе работы космического аппарата (КА) Ulysses, проводившего измерения вне плоскости эклиптики, было установлено, что полярные КД, также как и экваториальные, являются источниками быстрого СВ. Так в период солнечного минимума в 1994 г. приборами Ulysses при прохождении КА над южным полюсом Солнца в течение 100 дней наблюдалась высокая скорость СВ около 700 км/с [Neugebauer et al., 1995; Ko et al., 1997]. Аналогичные результаты

были получены в 1995 г. при прохождении КА над северным полюсом Солнца [McComas et al., 1998]. Информация о характеристиках СВ за пределами эклиптики может быть получена также путем наблюдения межпланетных мерцаний (см., например, [Чашей и др., 2020, 2022]). Такие наблюдения подтверждают также, что на высоких широтах в гелиосфере могут присутствовать потоки СВ, связанные с долгоживущими полярными КД (например, [Sime, Rickett, 1978; Baker, Paragiannis, 1982]).

Вопрос о возможности проникновения СВ из полярных КД в область низких широт вплоть до плоскости эклиптики не имеет пока точного ответа. Так, в работе [Munro, Jackson, 1977] показано, что границы полярных КД на расстоянии до пяти солнечных радиусов находятся на широте около 25° . Поскольку, согласно принятым представлениям, СВ начиная с таких расстояний распространяется радиально, это не допускает возможности его проникновения в область эклиптики. В то же время в [Wang, Sheeley, 1990] отмечено, что в 1985–1987 гг. суммарная площадь КД, находившихся на широтах ниже 45° , снижалась почти до нуля, но скорость СВ оставалась высокой, что можно считать косвенным указанием на вклад полярных КД. В работе [Борисенко, Богачёв, 2020] авторы предположили, что потоки СВ, связанные с полярными КД, можно обнаружить в плоскости эклиптики при выполнении двух условий: 1) измерения проводятся в минимуме солнечной активности; 2) на стороне Солнца, обращенной к Земле, отсутствуют любые КД, кроме полярных. В этом случае, по их мнению, открытые линии магнитного поля из полярных КД могут опуститься до плоскости эклиптики. В результате в область эклиптики сможет проникать СВ, ускоренный в полярных КД. Авторы исследовали данные, полученные в марте 2019 г. (в минимуме между 24-м и 25-м солнечными циклами), и нашли коэффициент корреляции 0.82 между скоростью СВ и площадью южной полярной КД. Исследования за иные периоды не проводились, и вопрос, является этот результат характерным или представляет собой исключение, решен не был. В настоящей работе мы проводим похожее исследование, но для иного периода — минимума солнечной активности между 22-м и 23-м циклами. Мы существенно доработали метод измерения площади КД, что позволило полностью автоматизировать процедуру обработки данных и провести исследование для трех серий изображений. Мы излагаем в работе метод исследования и представляем полученные результаты и выводы.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Мы использовали три основных критерия при выборе периодов времени для исследования. Во-первых, исследованные интервалы времени должны находиться вблизи минимума солнечной активности между 22-м и 23-м солнечными циклами. На рис. 1 показан усредненный индекс солнечных пятен, измеренный с 1990 по 2000 г. (использованы данные базы SILSO Королевской обсерватории Бельгии [www.sidc.be/silso]). Мы выбрали для исследования

1996 г., так как в течение этого года число пятен находилось на самом низком уровне за десятилетие. Поскольку орбита Земли наклонена к солнечному экватору под углом $\sim 7^\circ$, полярные КД раз в год максимально наклоняются в сторону Земли (южная КД в марте и северная КД в сентябре). Мы полагаем, что влияние полярных КД на Землю в этот период является наиболее сильным. По этой причине мы выбрали два временных интервала 1996 г.: февраль–апрель для южной полярной КД и август–октябрь для северной полярной КД. Третьим критерием являлось отсутствие в исследованный период на диске Солнца любых крупных КД, кроме полярных. Эта проверка осуществлялась нами путем визуального изучения изображения. В результате для исследования мы выбрали три серии изображений, информация о которых приведена в табл. 1.

Для измерения скорости СВ мы использовали данные прибора SWE (Solar Wind Electron), работавшего в 1996 г. на КА Wind. SWE включал в себя спектрометр электронов и ионов VEIS (Vector Electron and Ion Spectrometer), который в числе прочего предоставлял информацию о скорости СВ, измеряемой с шагом около 2 мин. Поскольку измерения Wind проводились в точке либрации L1, находящейся на расстоянии около 1 а.е. от Солнца, существует задержка между временем формирования СВ около Солнца и временем его регистрации в точке L1. По этой причине мы использовали измерения СВ, полученные не в интервалы времени, указанные в табл. 1, а в предшествующие им интервалы, сдвинутые на величину $\Delta t = a/v$, где a — расстояние от Солнца до точки L1 (~ 148.0 млн. км), v — средняя скорость СВ в исследуемый период, которая определялась экспериментально. Формула предполагает, что СВ распространяется радиально с постоянной скоростью, равной скорости около Земли. Такое предположение не вполне корректно, но часто используется при оценке времени транзита СВ до Земли (например, [Masnieil et al., 2019]). Скорость СВ усреднялась нами в интервале времени ± 1 ч.

Для измерения площади КД мы использовали изображения Солнца в спектральной линии 195 \AA , полученные в 1996 г. с помощью телескопа EIT (Extreme ultraviolet Imaging Telescope) на КА SOHO (Solar and Heliospheric Observatory). EIT предоставлял изображения полного солнечного диска размером 1024×1024 пк с угловым разрешением $2.6''/\text{пк}$. Канал 195 \AA был выбран, поскольку, по нашему мнению, КД в нем имеют наибольший контраст по сравнению с окружающей спокойной короной.

Для поиска КД и измерения их площади мы разработали полностью автоматическую процедуру. На первом шаге мы выбирали фрагмент изображения Солнца для южного полюса (март 1996 г.) или для северного полюса (сентябрь, октябрь 1996 г.). Пример изображения (фрагмент) показан слева на верхней панели рис. 2. Все фрагменты для всей серии изображений суммировались для увеличения отношения сигнал/шум. После этого строилось распределение яркости для усредненного изображения. Это распре-

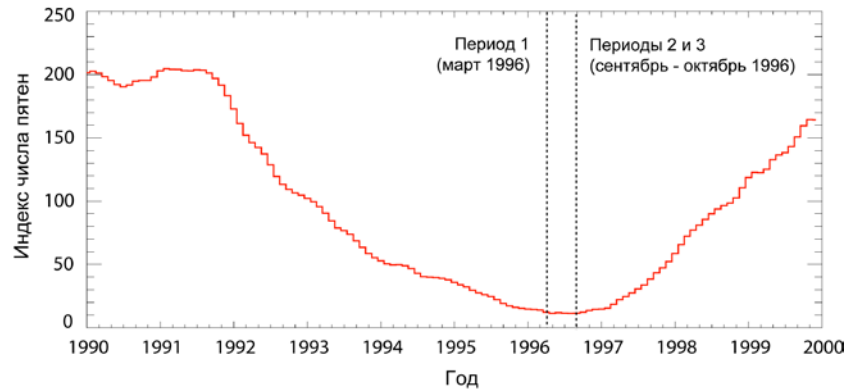


Рис. 1. Изменение числа солнечных пятен в 1990–2000 гг. Вертикальные линии показывают выбранные периоды наблюдений в марте и сентябре–октябре 1996 г.

Таблица 1

Информация о выбранных сериях изображений

№	Время начала, UT	Время окончания, UT	Длительность, сут	Число изображений	Тип КД
1	05.03.1996 07:09	20.03.1996 00:38	14.7	54	южная
2	16.09.1996 20:50	28.09.1996 23:01	12.1	111	северная
3	02.10.1996 01:05	11.10.1996 23:00	9.9	112	северная

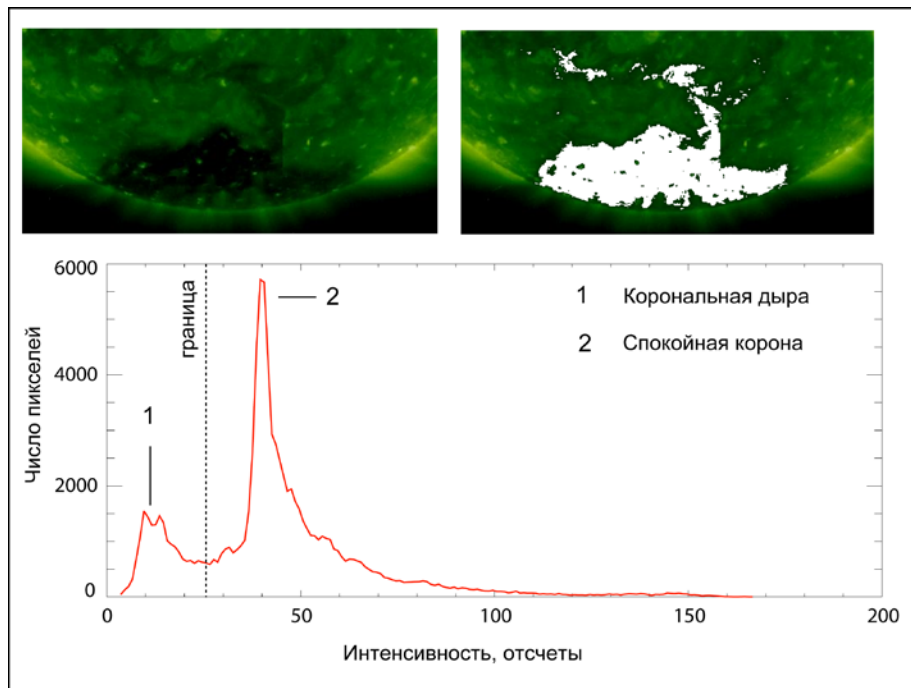


Рис. 2. Определение положения и площади полярных КД. Верхняя панель: слева — исходное изображение Солнца в линии 193 Å; справа — то же изображение, на котором показана найденная КД. Нижняя панель — распределение интенсивности на изображении

деление для южной КД в марте 1996 г. (серия № 1) показано на нижней панели рис. 2. Распределение имеет два максимума, первый из которых соответствует КД, второй — спокойной короне Солнца. Нижняя точка (минимум) между двумя максимумами приблизительно соответствует уровню интенсивности излучения на границе КД. Чтобы найти эту точку, мы аппроксимировали область минимума параболой.

Справа на верхней панели показана найденная таким способом КД. Белым цветом закрашены все пиксели, интенсивность излучения которых меньше, чем найденная граница. Число соответствующих пикселей пропорционально площади КД (без учета эффектов проекции).

Площадь КД существенно зависит от метода определения ее границы. В [Reiss et al., 2021] было

показано, что в зависимости от метода параметры, такие как площадь КД, средняя интенсивность излучения из КД и средняя напряженность магнитного поля в ней, могут меняться на множитель от 1 до 4.5. В применяемом нами методе погрешность площади КД определяется точностью нахождения минимума между максимумами 1 и 2 (см. рис. 2). В среднем эта точность составляет ± 2 отсчета, что соответствует средней погрешности $\sim 20\%$. В то же время, поскольку для всех КД в каждой серии данных используется один и тот же критерий для границы, ошибка имеет системный характер, т. е. площадь либо завышается, либо занижается сразу для всех КД. Такое изменение площади КД эквивалентно умножению всех измерений на постоянный множитель и не должно влиять на общий вид зависимости площади от времени. По этой причине мы полагаем, что выводы о наличии или отсутствии корреляции между площадью КД и скоростью СВ не будут существенно зависеть от малых изменений в положении границы КД. Заметим, что коэффициент корреляции $r(x, y)$, рассчитываемый по формуле Пирсона, который используется в работе, не меняется при умножении x , y на постоянные множители.

Используя изложенную выше процедуру, мы обработали все три серии изображений. Результаты приведены в следующем разделе.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Из наблюдения КД на низких и средних широтах хорошо известно, что существует зависимость между площадью КД и скоростью формируемого в ней СВ (например, [Hofmeister et al., 2020]). По этой причине мы предполагаем, что, если СВ формируется в полярной КД, должна наблюдаться корреляция между скоростью СВ и площадью полярной КД.

На рис. 3–5 показано изменение скорости СВ (нижняя панель слева) и площади полярной КД (верхняя панель слева) для трех исследованных серий изображений, перечисленных в табл. 1. Справа на каждом рисунке приведено изображение соответствующей полярной КД (южной для серии № 1 и северной для серий № 2, 3).

При измерении площади мы специально не ввели коррекцию, связанную с эффектом проекции. Это объясняется нашим предположением о том, что наибольшее влияние на СВ около Земли оказывает низкоширотная часть КД, так как она ближе всего к плоскости эклиптики. Если коррекция не производится, относительный вклад низкоширотной части в общую площадь КД будет выше и корреляция, если она присутствует, будет более выраженной.

Во всех трех случаях мы обнаружили заметную корреляцию между изменением площади наклоненной к Земле полярной КД и изменением скорости солнечного ветра около Земли. Для серии № 1 (март 1996 г., южная КД) и для серии № 2 (сентябрь 1996 г., северная КД) коэффициент корреляции составляет 64 %, а для серии № 3 (октябрь 1996 г., северная КД) — 85 %. Мы также отмечаем схожее общее поведение графиков для площади КД и скорости СВ. Мы полагаем, что указанное согласие между пло-

щадью КД и скоростью СВ сразу для трех исследованных периодов не может быть случайным и косвенно подтверждает возможность проникновения СВ из полярных КД в околоземное космическое пространство. Ранее в работе [Борисенко, Богачёв, 2020], как уже отмечалось, была обнаружена высокая степень корреляции между скоростью СВ и площадью южной полярной КД, наблюдавшейся в марте 2020 г. Отметим, что исследование для марта 2019 г. проводилось на основе данных других инструментов: площадь КД измерялась с помощью телескопа AIA на спутнике SDO в канале 193 Å; скорость СВ — по данным прибора SWEPAM на КА ACE. Тем самым данный результат подтвержден не только для другого периода времени, но и для других инструментов.

Поскольку полярные КД могут иметь «языки», простирающиеся на широты, более низкие чем основное тело КД (см., например, рис. 4), представляет интерес вопрос о корреляции СВ не только с полной площадью полярной КД, но и отдельно с ее низкоширотными участками, особенно вблизи центрального меридиана. Чтобы ответить на этот вопрос, мы сравнили в таблице 2 коэффициенты корреляции для площади КД, измеренной в секторе долгот $\pm 15^\circ$, $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 60^\circ$, $\pm 75^\circ$ и $\pm 90^\circ$ относительно центрального меридиана. Последнее значение ($\pm 90^\circ$) соответствует полной площади КД.

Таким образом, по этим данным полная площадь полярной КД лучше коррелирует со скоростью СВ, чем участки КД вблизи центрального меридиана.

Мы хотели бы отметить, что с низкоширотными КД обычно связаны потоки высокоскоростного СВ (600 км/с и более). Вопрос об источниках медленного СВ пока является предметом дискуссии. В качестве одного из возможных механизмов рассматривается ускорение медленного СВ в активных областях на Солнце (см., например, [Stansby et al., 2021; Богачёв и др., 2022]). В данном случае, согласно рис. 3–5, в полярных КД формируется СВ со скоростями 460–500 км/с, что ближе к медленной компоненте. Насколько нам известно, ранее полярные КД как возможный источник медленного СВ не рассматривались. Более низкая скорость СВ из полярных КД по сравнению с низкоширотными КД может быть связана с более высоким значением фактора расширения f (см., например, [Wang, Sheeley, 1990]). Речь идет о том, что в отсутствие низкоширотных КД, открытые линии поля из полярной КД могут заполнять всю полусферу до плоскости эклиптики, т. е. расширяться до угла 2π . Если нижняя граница КД находится на широте $\sim 60^\circ$ (это примерно соответствует изученным КД), соответствующий телесный угол составляет $2\pi(1 - \cos 30^\circ) \approx 0.27\pi$. Соответствующий коэффициент расширения $f = 2\pi / (0.27\pi) \approx 7$, что, согласно [Wang, Sheeley, 1990], соответствует скорости СВ в диапазоне 550–650 км/с. Измеренные нами значения несколько ниже и равны 450–500 км/с. Возможно, это связано с тем, что на скорость СВ вблизи эклиптики влияют в основном края КД, в которых расширение превышает среднее значение, а скорость СВ соответственно ниже.

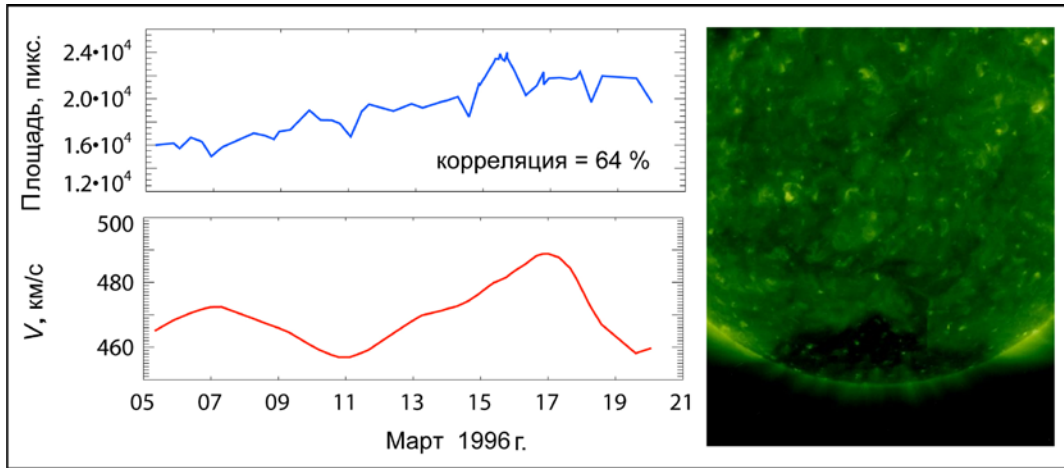


Рис. 3. Изменение площади КД [пк] (слева сверху) и скорости СВ [км/с] (слева внизу) в марте 1996 г. Справа — изображение КД

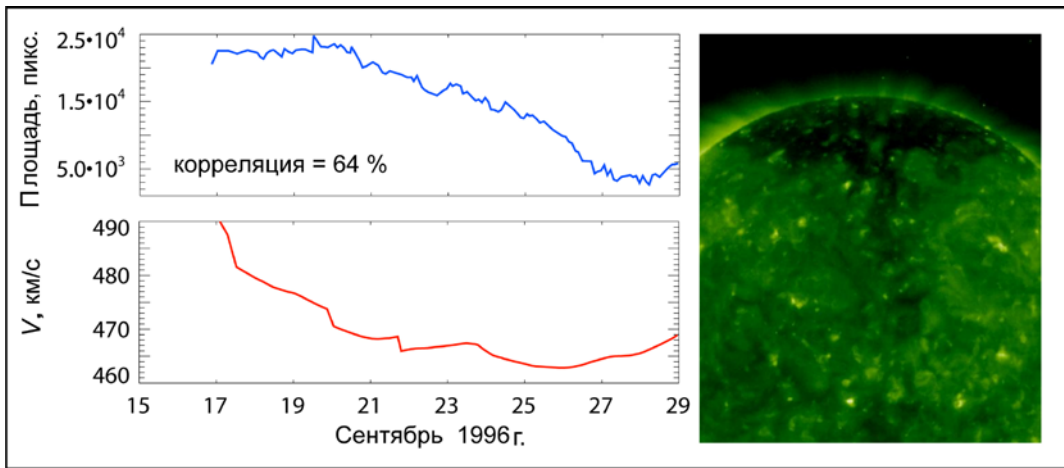


Рис. 4. То же для сентября 1996 г.

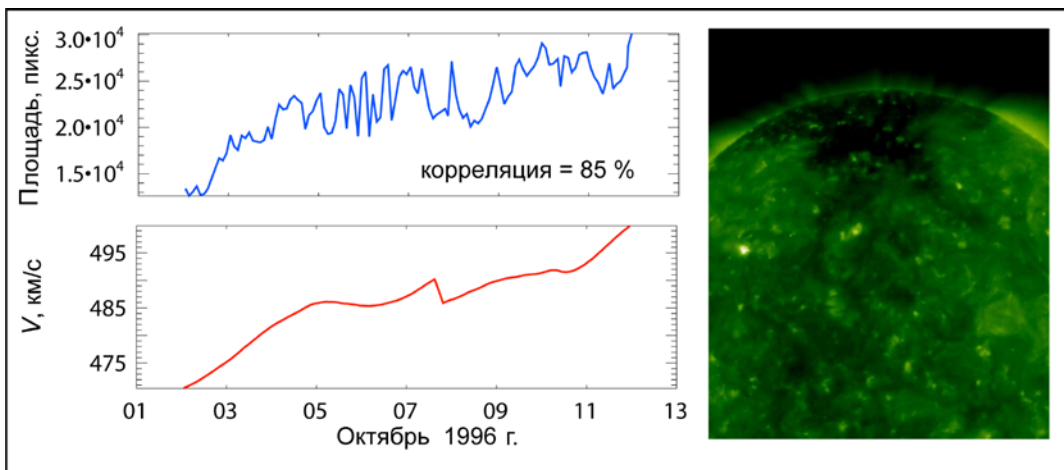


Рис. 5. То же для октября 1996 г.

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между площадью КД и скоростью СВ для разных интервалов долгот относительно центрального меридиана (ЦМ)

№	Период наблюдений	Интервал долгот					
		ЦМ±15°	ЦМ±30°	ЦМ±45°	ЦМ±60°	ЦМ±75°	ЦМ±90°
1	05–20.03.1996	-0.02	0.36	0.54	0.61	0.64	0.64
2	16–28.09.1996	0.70	0.66	0.64	0.65	0.64	0.64
3	02–11.10.1996	0.56	0.70	0.84	0.85	0.85	0.85

Можно заметить, что по некоторым данным помимо площади КД на скорость СВ может влиять также поток магнитного поля (см., например, [Просовецкий, Мягкова, 2011; Ахтемов, Цап, 2021]). Однако для полярных КД из-за сильных эффектов проекции проведение измерений магнитного поля затруднительно. По этой причине мы не проводили такое исследование в этой работе.

Ранее в [Kirov et al., 2015] обсуждалась возможность формирования геомагнитной активности в минимуме солнечного цикла в результате влияния полярных КД. Мы наблюдаем связь между полярными КД и скоростью СВ и по этой причине не исключаем такую возможность. Но в данном конкретном случае мы не обнаружили повышенной геомагнитной активности.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-30002, [<https://rscf.ru/project/23-72-30002/>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ахтемов З.С., Цап Ю.Т. О зависимости магнитного поля низкоширотной корональной дыры от ее площади. *Письма в Астрономический журнал*. 2021. Т. 47, № 2. С. 138–144. DOI: [10.31857/S0320010821010010](https://doi.org/10.31857/S0320010821010010).

Богачёв С., Рева А., Кириченко А. и др. Влияние активных областей на характеристики солнечного ветра в максимуме цикла. *Письма в Астрономический журнал*. 2022. Т. 48, № 7. С. 523–532. DOI: [10.31857/S0320010822070038](https://doi.org/10.31857/S0320010822070038).

Борисенко А.В., Богачёв С.А. Влияние полярных корональных дыр на характеристики солнечного ветра в минимуме активности между 24-м и 25-м солнечными циклами. *Письма в Астрономический журнал*. 2020. Т. 46, № 11. С. 802–813. DOI: [10.31857/S0320010820110017](https://doi.org/10.31857/S0320010820110017).

Просовецкий Д.В., Мягкова И.Н. Связь топологии квазиткрытых структур солнечного магнитного поля и геомагнитных возмущений. *Солнечно-земная физика*. 2011. № 17. С. 68–73.

Чашей И.В., Лебедева Т.О., Тюльбашев С.А., Субаев И.А. Коротирующие и распространяющиеся возмущения в солнечном ветре по данным мониторинга межпланетных мерцаний на радиотелескопе БСА ФИАН в 2017 г. *Астрономический журнал*. 2020. Т. 97, № 1. С. 73–88. DOI: [10.31857/S0004629920010089](https://doi.org/10.31857/S0004629920010089).

Чашей И.В., Тюльбашев С.А., Субаев И.А. Солнечный ветер от максимума до минимума 24 цикла в данных мониторинга межпланетных мерцаний. *Астрономический журнал*. 2022. Т. 99, № 1. С. 48–53. DOI: [10.31857/S0004629922010030](https://doi.org/10.31857/S0004629922010030).

Baker K.V., Papagiannis M.D. Correlation of high latitude coronal holes with solar wind streams far above or below the ecliptic. *Solar Phys.* 1982. Vol. 78. P. 365–372. DOI: [10.1007/BF00151616](https://doi.org/10.1007/BF00151616).

Hofmeister S.J., Veronig A.M., Poedts S., et al. On the dependency between the peak velocity of high-speed solar wind streams near earth and the area of their solar source coronal holes. *Astrophys. J. Lett.* 2020. Vol. 897, no. 1. P. L17. DOI: [10.3847/2041-8213/ab9d19](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab9d19).

Kirov B., Asenovski S., Georgieva K., Obridko V.N. What causes geomagnetic activity during sunspot minimum? *Geomagnetism and Aeronomy*. 2015. Vol. 55. P. 1033–1038. DOI: [10.1134/S0016793215080149](https://doi.org/10.1134/S0016793215080149).

Ko Y.-K., Fisk L.A., Geiss J., et al. An empirical study of the electron temperature and heavy ion velocities in the south polar coronal hole. *Solar Phys.* 1997. Vol. 171, no. 2. P. 345–361. DOI: [10.1023/A:1004943213433](https://doi.org/10.1023/A:1004943213433).

Krieger A.S., Timothy A.F., Roelof E.C. A coronal hole and its identification as the source of a high velocity solar wind stream. *Solar Phys.* 1973. Vol. 29. P. 505–525. DOI: [10.1007/BF00150828](https://doi.org/10.1007/BF00150828).

Macneil A.R., Owen C.J., Baker D., et al. Active region modulation of coronal hole solar wind. *Astrophys. J.* 2019. Vol. 887, no. 2. P. 146. DOI: [10.3847/1538-4357/ab5586](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab5586).

McComas D.J., Riley P., Gosling J.T. et al. Ulysses' rapid crossing of the polar coronal hole boundary. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 1998. Vol. 103, no. A2. P. 1955–1967. DOI: [10.1029/97JA01459](https://doi.org/10.1029/97JA01459).

Munro R.H., Jackson B.V. Physical properties of a polar coronal hole from 2 to 5 R sun. *Astrophys. J.* 1977. Vol. 213. P. 874–886. DOI: [10.1086/155220](https://doi.org/10.1086/155220).

Neugebauer M., Goldstein B.E., McComas D.J., et al. Ulysses observations of microstreams in the solar wind from coronal holes. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 1995. Vol. 100, no. A12. P. 23389–23395. DOI: [10.1029/95JA02723](https://doi.org/10.1029/95JA02723).

Nolte J.T., Krieger A.S., Timothy A., et al. Coronal holes as sources of solar wind. *Solar Phys.* 1976. Vol. 46. P. 303–322. DOI: [10.1007/BF00149859](https://doi.org/10.1007/BF00149859).

Reiss M.A., Muglach K., Möstl C., et al. The Observational Uncertainty of Coronal Hole Boundaries in Automated Detection Schemes. *Astrophys. J.* 2021. Vol. 913. P. 28–36. DOI: [10.3847/1538-4357/abf2c8](https://doi.org/10.3847/1538-4357/abf2c8).

Rotter T., Veronig A.M., Temmer M., Vršnak B. Relation between coronal hole areas on the Sun and the solar wind parameters at 1 AU. *Solar Phys.* 2012. Vol. 281. P. 793–813. DOI: [10.1007/s11207-012-0101-y](https://doi.org/10.1007/s11207-012-0101-y).

Sime D.G., Rickett B.J. The latitude and longitude structure of the solar wind speed from IPS observations. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 1978. Vol. 83, no. A12. P. 5757–5762. DOI: [10.1029/JA083iA12p05757](https://doi.org/10.1029/JA083iA12p05757).

Stansby D., Green L.M., van Driel-Gesztelyi L. Active region contributions to the solar wind over multiple solar cycles. *Solar Phys.* 2021. Vol. 296, no. 8. P. 116. DOI: [10.1007/s11207-021-01861-x](https://doi.org/10.1007/s11207-021-01861-x).

Waldmeier M. Analyse einer koronalen Kondensation. Mit 3 Textabbildungen. *Zeitschrift für Astrophysik*. 1956. Vol. 40. P. 221–235.

Wang Y.M., Sheeley Jr N.R. Solar wind speed and coronal flux-tube expansion. *Astrophys. J.* 1990. Vol. 355. P. 726–732.

URL: <https://rscf.ru/project/23-72-30002/> (дата обращения 15 апреля 2023 г.).

Статья подготовлена по материалам Восемнадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 6–10 февраля 2023 г., ИКИ РАН, Москва.

Как цитировать эту статью:

Борисенко А.В., Богачёв С.А. Связь между площадью полярных корональных дыр и скоростью солнечного ветра в минимуме между 22-м и 23-м солнечными циклами. *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9, № 3. С. 122–127. DOI: [10.12737/szf-93202313](https://doi.org/10.12737/szf-93202313).