

О СВЯЗИ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР СРЕДНИХ И НИЗКИХ ШИРОТ С ОБЩИМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ СОЛНЦА

З.С.АХТЕМОВ, Ю.Т.ЦАП, В.И.ХАНЕЙЧУК

Поступила 6 сентября 2019

Принята к печати 24 июня 2020

На основе ультрафиолетовых изображений и магнитограмм, полученных на спутнике Solar Dynamics Observatory, исследована связь между магнитными потоками и площадями корональных дыр (КД) средних и низких широт $|\varphi| < 60^\circ$ с общим магнитным полем (ОМП) Солнца за период с 19.01.2012 по 07.12.2012гг. Показано, что границы КД, определенные с помощью алгоритмов CHIMERA (<https://solarmonitor.org>) и SPOCA (<https://helioviewer.org>), существенно различаются. Коэффициент корреляции между взвешенной суммарной площадью КД, учитывающей знак их магнитного поля, и ОМП лежит в пределах от 0.82 до 0.88. КД могут вносить существенный вклад в ОМП, поскольку их поля имеют открытую конфигурацию и не сбалансированы на солнечном диске. В свете теории солнечного динамо и полученных результатов обсуждаются годовые временные задержки между максимумами чисел Вольфа и значений ОМП.

Ключевые слова: *Солнце: корональные дыры: общее магнитное поле*

1. Введение. В настоящее время не вызывает сомнений, что быстрый (500-800 км/с) солнечный ветер, оказывающий существенное влияние на окружающее космическое пространство и магнитосферу Земли, формируется в корональных дырах (КД), т.е. в крупномасштабных униполярных магнитных областях с пониженной корональной плотностью и температурой [1-4]. Магнитные поля КД имеют обычно открытую конфигурацию и занимают иногда значительные площади на средних и низких широтах. Наряду с полями других образований, они вносят вклад в общее магнитное поле (ОМП), которое является, по сути, мерой разбаланса магнитных потоков на диске Солнца [3].

Согласно некоторым моделям солнечного динамо, трансформация торoidalной компоненты магнитного поля Солнца в полоидальную может происходить не только вблизи тахоклина или в конвективной зоне, но и на поверхности Солнца [3]. Как следует из модели Бэбкока-Лейтона [5,6], магнитные поля активных областей должны определять основные характеристики солнечного цикла и, таким образом, влиять на многие процессы на Солнце, в том числе и на ОМП. Это предполагает наличие тесной связи между ОМП и активными областями. Откуда следует необходимость детального изучения

вклада различных магнитных образований в ОМП. Отметим, что здесь и в дальнейшем, если это специально не оговаривается, под ОМП мы будем понимать как усредненное по диску фотосферное поле B_{mean} , так и магнитное поле Солнца как звезды B_{star} , считая данные величины эквивалентными.

Если в минимуме солнечной активности КД концентрируются в области полюсов, то ближе к максимуму они могут появляться на средних и низких широтах [7,8], зачастую занимая значительную часть солнечного диска на протяжении многих оборотов Солнца [9]. Корональные дыры создают открытый магнитный поток, который, в свою очередь, формирует межпланетное магнитное поле [10]. Хотя к настоящему времени существование связи между ОМП, эволюцией и характеристиками КД сомнений не вызывает [3,11,12], тем не менее все еще остается много невыясненных вопросов. Так, на основе данных Wilcox Solar Observatory (WSO, <http://wso.stanford.edu/>) за период с 1975 по 1990гг. были получены указания в пользу существования достаточно слабой корреляции между ОМП и числами Вольфа (максимум ОМП отстает почти на 2 года от максимума чисел Вольфа) [13], хотя в 22-м цикле эти максимумы почти совпадают [14].

На наш взгляд, за наблюдаемые задержки могут быть ответственны магнитные поля КД, в первую очередь, средних и низких широт. Косвенным свидетельством такого предположения может служить тот факт, что знак полярности ОМП довольно часто совпадает со знаком усредненных магнитных полей КД. Это можно видеть, в частности, на рис.1, построенном по результатам измерений ОМП WSO и Крымской астрофизической обсерватории (КрАО РАН, <http://solar.crao.crimea.ru/eng/mmfm.htm>), а также данным, полученным с помощью алгоритма Coronal Hole Identification via Multi-thermal Emission Recognition Algorithm (CHIMERA) в апреле-мае 2012г.

Цель настоящей работы - детально исследовать связь между магнитным полем КД средних и низких широт и ОМП на фазе роста 24-го цикла солнечной активности. Затем, исходя из полученных результатов и современных представлений о механизмах солнечного гидромагнитного динамо, попытаться выяснить природу найденной нами зависимости, ограничившись качественными соображениями.

2. Выборка и анализ данных. При проведении исследований мы ограничились периодом с 19.01.2012 по 07.12.2012гг. (CR2119-CR2131), что соответствует второй фазе роста солнечной активности 24-го цикла, сопровождаемой появлением вблизи экватора КД различной полярности (рис.2). Для определения границ КД средних и низких широт $|\phi| < 60^\circ$, мы воспользовались результатами численных расчетов, полученными с помощью алгоритмов Spatial Possibilistic Clustering Algorithm (SPoCA) [15] и CHIMERA [16], которые

представлены на сайтах <https://helioviewer.org> и <https://solarmonitor.org> соответственно. Отметим, что границы КД, *могут существенно отличаться*, для разных алгоритмов (рис.2), хотя они следуют из результатов наблюдений на одних и тех же инструментах - Atmospheric Imaging Assembly и Helioseismic and Magnetic Imager (HMI), размещенных на спутнике Solar Dynamics Observatory (SDO). Напряженность ОМП Солнца определялась из магнитограмм продольного магнитного поля SDO/HMI, а также данных WSO и Башенного солнечного телескопа КрАО РАН БСТ-1. Для оценки знака магнитного поля КД нами привлекались и модельные расчеты магнитного поля (http://www.lmsal.com/solarsoft/ssw_packages_info.html) в потенциальном приближении,

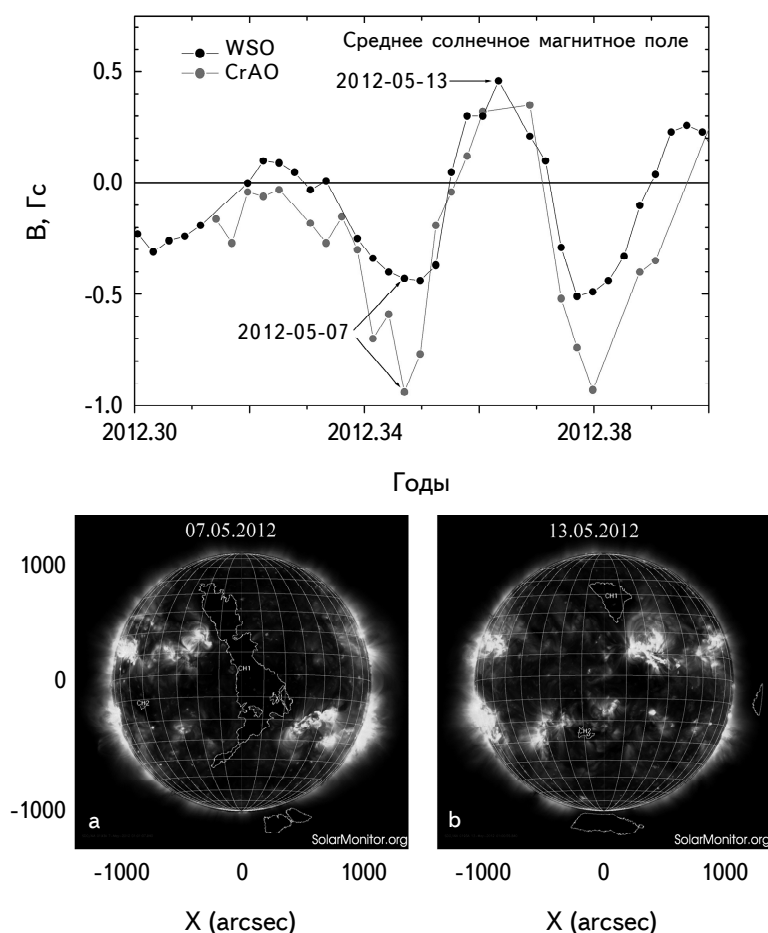


Рис.1. Верхняя панель: вариации ОМП Солнца как звезды по данным измерений WSO (черный цвет) и КрАО (серый цвет) в апреле-мае 2012г. Нижняя панель: изображения КД (https://solarmonitor.org), идентифицированные с помощью алгоритма CHIMERA 07.05.2012г. (слева) и 13.05.2012г. (справа). Усредненные значения магнитных полей КД (CHIMERA) соответственно равны -3.8 Гс и +3.2 Гс.

выполненные с помощью программы Potential Field Source Surface (PFSS, рис.3). Из рис.2 и 3 следует, что в соответствующие моменты времени на низких и средних широтах доминировали КД с полями отрицательной магнитной полярности. Мы также использовали табличные значения, доступные на сайте <https://solarmonitor.org/>, где кроме относительной площади проекций выделенных КД на картинную плоскость $A_{CH,k}$, где k - номер корональной дыры, приведены усредненные напряженности продольной (вдоль луча зрения) компоненты магнитного поля $\langle B_{los,k} \rangle$ и магнитные потоки $\Phi_{CH,k}$ в них, полученные с

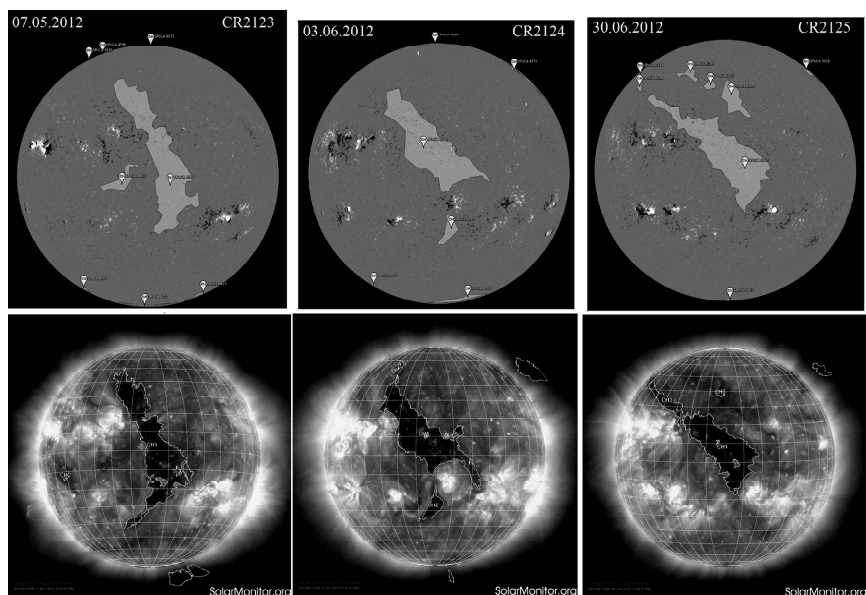


Рис.2. Примеры изображения КД на диске Солнца за период с 7.05.2012г. по 30.06.2012г. Верхний ряд: КД идентифицированы алгоритмом SPoCA, нижний - алгоритмом CHIMERA.

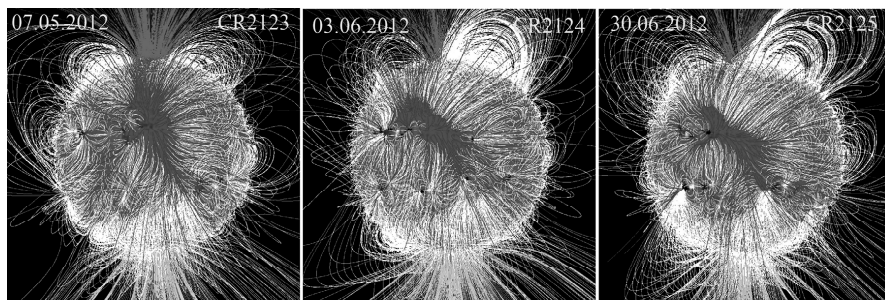


Рис.3. Силовые линии магнитного поля Солнца, полученные с помощью программы PFSS из магнитограмм SDO/HMI за период с 7.05.2012 по 30.06.2012.

помощью алгоритма CHIMERA. Подчеркнем, что на сайте <https://helioviewer.org/> представлены два варианта площади КД (SPoCA): AREA RAW (area of event in sky plane) и AREA AT DISK CENTER. Поскольку на магнитограммах SDO/HMI приведены значения лишь для продольной компоненты магнитного поля, то в рассматриваемом случае мы брали площади AREA RAW $A_{SP,k}$.

Хотелось бы также обратить внимание на следующее важное обстоятельство. Согласно описанию алгоритма CHIMERA [16], значение магнитных потоков КД $\Phi_{CH,k}$ определяется как произведение усредненной продольной компоненты магнитного поля $\langle B_{los,k} \rangle$ и площади КД $A_{tot,k} = \sum_{pix} A_{cos,N}$ (true coronal hole area), где $A_{cos,N} = A_N / \cos \alpha_N$, A_N - площадь проекции на картинную плоскость N -го пиксела и α_N - угол относительно центра солнечного диска (см. табл. I в [16]). Такой подход может приводить к погрешностям, поскольку в действительности полный магнитный поток выделенной КД $\Phi_k = \sum_{pix} B_{cos,N} A_{cos,N}$, где $B_{cos,N} = B_{los,N} / \cos \alpha_N$ [17]. Более того, в рассматриваемом случае вклад магнитного поля КД в сигнал ОМП определяется продольными магнитными потоками $\Phi_{los,k} = \sum_{pix} B_{los,N} A_N$. Вследствие этого использование данных, полученных с помощью CHIMERA, будет приводить к завышенным значениям $\Phi_{los,k}$ из-за эффекта проекции (значения Φ_k , наоборот, будут занижены).

Принимая во внимание вышесказанное, для грубой оценки относительного вклада суммарного продольного магнитного потока Φ_{los} в ОМП мы вычисляли суммарные взвешенные площади A_{CH} и A_{SP} , равные сумме площадей средне- и низкоширотных КД с весовой функцией, соответствующей знаку полярности КД, т.е.

$$A_{X,k} = \begin{cases} + A_{X,k}, & \langle B_{los,k} \rangle > 0, \\ - A_{X,k}, & \langle B_{los,k} \rangle < 0, \end{cases} \quad (1)$$

$$A_X = \sum_{k=1}^m A_{X,k},$$

где нижний индекс X описывает площади, полученные согласно алгоритмам CHIMERA (CH) и SPoCA (SP), а m - число КД на диске Солнца в заданный момент времени. Такой подход можно считать оправданным, если относительные изменения для усредненных значений магнитных полей КД меньше, чем для соответствующих площадей. В пользу правомерности такого приближения свидетельствует, в частности, отсутствие выраженной зависимости между площадями и усредненными значениями магнитного поля КД [12]. Следует также отметить, что согласно [18,19], сигнал ОМП скорее определяется полями малой напряженности, которые могут занимать значительные площади на диске Солнца (см. также [10]). Используя выражение (1), мы находили сумму площадей КД с учетом знака магнитного поля (A_{CH} и A_{SP}) и сопоставляли ее со значениями ОМП Солнца, согласно данным SDO/HMI и WSO

при прохождении центра тяжести низкоширотных КД через центральный меридиан в каждом кэррингтоновском обороте.

3. Результаты статистического анализа. На фазе роста 24-го цикла солнечной активности с 19.01.2012 по 15.10.2012гг. (CR2119 - CR2129) низкоширотные КД Солнца занимали сравнительно небольшую площадь диска, которая суммарно не превышала 10% (<https://solarmonitor.org/>). Причем в соответствующие моменты времени для всех событий знаки A_{CH} , A_{SP} и ОМП, абсолютная величина которого не превосходила 1 Гс, с точностью до ошибок измерений совпадали - полярность была отрицательной.

На рис.4а представлены изменения во времени величины ОМП (SDO/HMI), магнитного потока $\Phi_{CH} = \sum_k^m \Phi_{CH,k}$ и величины A_{CH} для этого же алгоритма. Видно, что кривые достаточно хорошо согласуются между собой. Коэффициенты корреляции R между ОМП и потоком Φ_{CH} , а также между ОМП и A_{CH} оказались равными 0.82 ± 0.19 . В этом нет ничего удивительного, поскольку для Φ_{CH} и A_{CH} значение R , как показывает анализ, достигает 0.95 ± 0.10 , что свидетельствует в пользу более сильной зависимости магнитного потока от площадей КД и их полярности, чем от напряженности магнитного поля.

На рис.4б представлены результаты сопоставления суммарных взвешенных площадей A_{SP} и ОМП (SDO/HMI) (значения магнитного потока КД на сайте <https://helioviewer.org> не приводятся).

Видно, что и здесь соответствующие кривые достаточно хорошо согласуются между собой, а коэффициент корреляции между A_{SP} и ОМП равен 0.88 ± 0.16 . В свою очередь, для величин A_{SP} и значений ОМП, полученных в WSO, $R = 0.90 \pm 0.13$ (рис.4с).

Сравнение данных между значениями средней напряженности магнитного поля (рис.5), полученными из магнитограмм B_{mean} (SDO/HMI) и B_{star} (WSO), также показало достаточно хорошую корреляцию ($R = 0.92 \pm 0.10$). Отметим, что более полный анализ этих данных для $N = 1507$ измерений дает $R = 0.86$ [20]. Обращают также на себя внимание возможные значительные отклонения между измерениями на SDO/HMI и WSO, вплоть до знака полярности (рис.5, светлый кружок).

4. Обсуждение результатов. Наличие высокой корреляции между суммарными взвешенными площадями КД и значениями ОМП свидетельствует о том, что КД средних и низких широт могут вносить существенный, если не определяющий вклад в ОМП Солнца (см. также [10]). Даже с учетом заметных разногласий при определении границ КД с помощью алгоритмов CHIMERA и SPoCA, коэффициенты корреляции между данными величинами и ОМП оказываются довольно высокими ($R > 0.8$) и достигают 0.88 ± 0.16 . Обнаруженная связь может быть объяснена тем, что поля КД имеют открытую

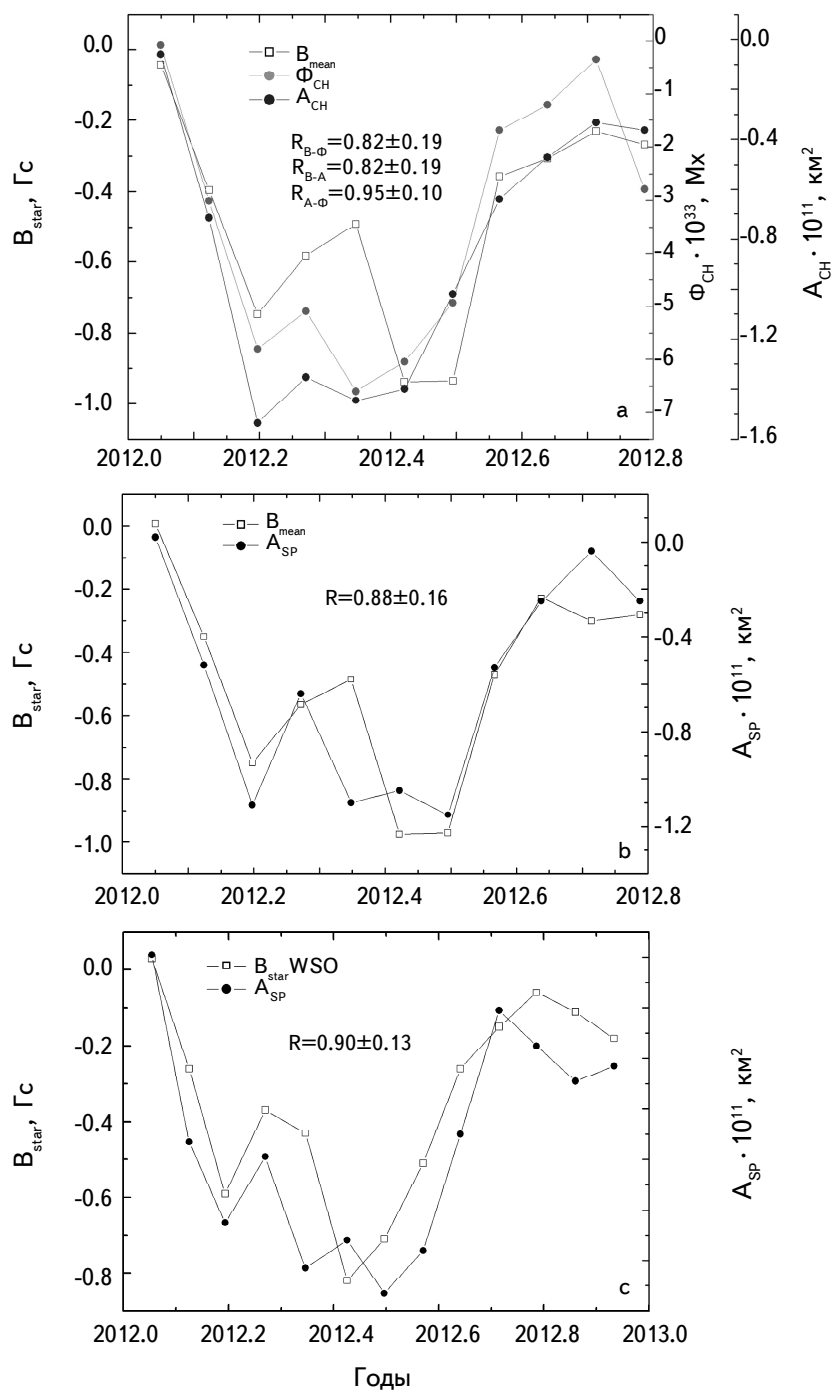


Рис.4. Зависимости ОМП Солнца, взвешенных площадей A_{Φ} (см. выражение 1) и магнитного потока Φ_{CH} от времени по данным: а) CHIMERA - SDO/HMI; б) SpOCA - SDO/HMI; в) SpOCA - WSO.

конфигурацию и не являются сбалансированными какими-либо другими магнитными образованиями на диске Солнца, что подтверждается также расчетами PFSS (рис.3). Следует также принять во внимание, что их вклад в ОМП достигает максимальных значений при прохождении КД через центральный меридиан.

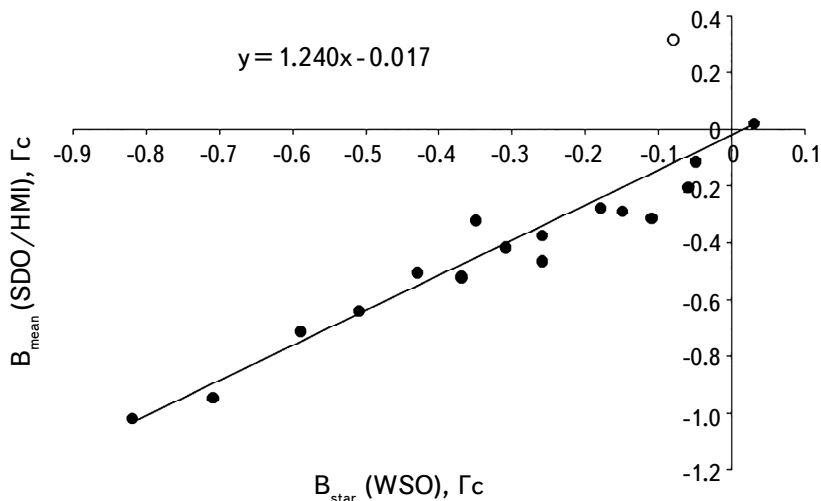


Рис.5. Сравнение значений среднего магнитного поля B_{mean} и ОМП как звезды B_{star} , полученных по данным SDO/HMI и обсерватории WSO.

Поскольку поля КД средних и низких широт связаны с ОМП (рис.4), то они, наряду с фоновыми полями, могут быть ответственными за обнаруженную временную задержку около 2 лет между значениями ОМП и числами Вольфа в 23 и 24-х циклах солнечной активности (В.И.Ханейчук, устное сообщение). Отметим, что подобные задержки достаточно трудно объяснить в рамках модели солнечного динамо Бэбкока-Лейтона. Это свидетельствует о том, что хотя крупномасштабные магнитные структуры тесно связаны с активными областями, тем не менее они способны эволюционировать независимо от них образом, например, вследствие генерации магнитного поля в более глубоких слоях солнечной конвективной зоны.

Как показывает проведенный анализ, расчет полных магнитных потоков КД Φ_k , полученных с помощью алгоритма CHIMERA, нельзя считать безупречным, а значит, использование соответствующих данных может приводить к некорректным выводам. Это связано с тем, что в [16] вместо радиальной компоненты магнитного поля была использована его продольная составляющая. Однако для рассмотренных нами КД, которые находились преимущественно в центре диска Солнца, значения Φ_{CH} дают приемлемую

оценку, поскольку изменения магнитного потока КД определяются в основном их площадью.

5. *Выводы.* В результате анализа данных площадей и магнитных потоков КД на фазе роста 24-го цикла солнечной активности:

1) найдена высокая корреляция ($R > 0.82$) между ОМП и суммарными взвешенными площадями средне- и низкоширотных КД, включая магнитные потоки по данным CHIMERA, свидетельствующая о значительном вкладе магнитных полей с открытой конфигурацией в сигнал ОМП;

2) получены указания в пользу определяющей роли площадей в формировании магнитного потока КД (коэффициент корреляция между A_{CH} и Φ_{CH} равен 0.95);

3) подтверждены результаты предыдущих исследований [18,19], предполагающие основной вклад фоновых полей небольшой напряженности в ОМП;

4) использование алгоритма CHIMERA приводит к заниженным/завышенным значениям продольных/полных магнитных потоков КД.

В заключение подчеркнем, что, на наш взгляд, полученная нами связь между ОМП Солнца и средне- и низкоширотными КД не является универсальной. На разных фазах солнечного цикла и в разных циклах некоторые из приведенных выше результатов могут претерпеть существенные изменения. Мы лишь попытались детально исследовать вклад магнитных полей КД в ОМП на сравнительно малом промежутке времени в определенной фазе солнечного цикла. Необходимость использования более общих подходов сомнений не вызывает.

Авторы очень признательны рецензенту за полезные замечания, которые заметно улучшили статью. SDO является проектом программы NASA Living With a Star. Данные SDO/HMI были предоставлены центром Joint Science Operation Center (JSOC). Данные Wilcox Solar Observatory, используемые в данном исследовании, были получены с вебсайта <http://wso.stanford.edu>, любезно предоставленные Дж.Т.Хоексема. Для расчета силовых линий магнитного поля использован пакет PFSS, разработанный M.L.Derosa, S.L.Freeland, C.J.Schryver и доступной на сайте <https://hesperia.gsfc.nasa.gov/ssw/packages/pfss/idl/pfss/>.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки (НИР № 0831-2019-0006).

¹ ФГБУН "КрАО РАН", АР Крым, Научный, e-mail: yur_crao@mail.ru

ON THE RELATIONSHIP OF CORONAL HOLES OF MIDDLE AND LOW LATITUDES WITH THE MEAN MAGNETIC FIELD OF THE SUN

Z.S.AKHEMOV, Y.T.TSAP, V.I.HANEYCHUK

Based on EUV images and magnetograms obtained with Solar Dynamics Observatory the relationship between the magnetic fluxes and total area of coronal holes (CH) of middle and low latitudes $|\phi| < 60^\circ$ with the Sun's mean magnetic field (MMF) for the period from 19 January to 07 December 2012 is investigated. It has been shown that CH boundaries determined with CHIMERA (<https://solarmonitor.org>) and SPoCA (<https://helioviewer.org>) algorithms can differ significantly. The correlation coefficient between the weighted total area of CHs taking into account the magnetic field polarity and MMF are in the range from 0.82 to 0.88. CHs can make a significant contribution to the MMF since their magnetic fields have open configuration and are not balanced on the solar disk. In the light of the solar dynamo model and obtained results the annual time delays between the peaks of Wolf numbers and MMF are discussed.

Keywords: *sun: coronal holes: mean magnetic field*

ЛИТЕРАТУРА

1. M.Waldmeier, Die Sonnenkorona 2. Basel, Verlag Birkhuser, 1957.
2. A.S.Krieger, A.F.Timothy, E.C.Roelof, Solar Phys., **29**, 505, 1973.
3. В.Н.Обридко, Ю.А.Наговицын, Солнечная активность, цикличность и методы прогноза, Санкт-Петербург, Изд-во ВВМ, 2018.
4. S.R.Cranmer, Living Rev. Solar Phys., **6**, 3, 2009.
5. H.W.Babcock, Astrophys. J., **133**, 572, 1961.
6. R.B.Leighton, Astrophys. J., **156**, 1, 1969.
7. P.S.McIntosh, R.J.Thompson, E.C.Willock, Nature, **360**, 322, 1992.
8. A.Tlatov, K.Tavastsherna, V.Vasil'eva, Solar Phys., **289**, 1349, 2014.
9. Z.S.Akhtemov, Yu.T.Tsap, Geomagnetism & Aeronomy, **58**, 1187, 2018.
10. Y.-M.Wang, N.R.Sheeley, J.Lean, Geophys. Res. Lett., **27**, 505, 2000.
11. I.A.Bilenko, K.S.Tavastsherna, Solar Phys., **291**, 2329, 2016.
12. I.A.Bilenko, K.S.Tavastsherna, Geomagnetism & Aeronomy, **57**, 803, 2018.
13. Ю.П.Ривин, В.Н.Обридко, Астрон. ж., **69**, 1083, 1992.
14. I.A.Bilenko, Geomagnetism & Aeronomy, **56**, 978, 2016.

15. *C.Verbeeck, V.Delouille, B.Mampaey et al.*, *Astron. Astrophys.*, **561**, A29, 2014.
16. *T.M.Garton, P.T.Gallagher, S.A.Murray*, *J. Space Weather & Space Climate*, **8**, A02, 2018.
17. *S.G.Heinemann, S.J.Hofmeister, A.M.Veronig et al.*, *Astrophys. J.*, **863**, 29, 2018.
18. *A.B.Severny*, *Quart. J. R. Astron. Soc.*, **12**, 363, 1971.
19. *В.А.Котов, Н.Н.Степанян, З.А.Щербакова*, *Изв. Крымс. астрофиз. обс.*, **56**, 75, 1977.
20. *A.S.Kutsenko, V.I.Abramenko*, *Solar Phys.*, **291**, 1613, 2016.