

О ЗАВИСИМОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НИЗКОШИРОТНОЙ КРОНАЛЬНОЙ ДЫРЫ ОТ ЕЕ ПЛОЩАДИ

© 2021 г. З. С. Ахтемов^{1*}, Ю. Т. Цап¹

¹Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Крым, Россия

Поступила в редакцию 24.08.2020 г.

После доработки 17.11.2020 г.; принята к публикации 26.11.2020 г.

На основе данных, полученных с помощью алгоритма CHIMERA, рассмотрена эволюция долгоживущей низкоширотной корональной дыры при прохождении центрального меридиана за период с 15.02.2012 по 14.10.2012 г. Коэффициент корреляции между напряженностью фотосферного магнитного поля корональной дыры и ее площадью за девять кэррингтоновских оборотов составил $R = -0.55$. Он заметно отличается от соответствующего значения $R = -0.82$, приведенного в работе Хейнеманна и др. Результаты свидетельствуют о существенной зависимости площади корональных дыр от метода определения их границ, что может оказать заметное влияние как на прогноз геомагнитной активности, так и на понимание природы солнечных явлений, связанных с этими образованиями.

Ключевые слова: Солнце, корональные дыры, магнитные поля.

DOI: 10.31857/S0320010821010010

ВВЕДЕНИЕ

Корональные дыры (КД) — это крупномасштабные ($\sim 10^{20}$ см²) образования солнечной короны, отличающиеся от окружающих спокойных областей открытой конфигурацией магнитного поля, а также пониженной плотностью и температурой плазмы (см., например, Кранмер, 2009). КД наблюдаются в мягком рентгеновском и крайнем ультрафиолетовом диапазонах на диске Солнца как темные образования, а на изображениях в линии HeI 10830 Å они имеют повышенную яркость. Интерес к КД обусловлен, в первую очередь, тем, что они являются источником быстрого солнечного ветра (Кранмер, 2002, 2009; Ахтемов, Цап, 2018), который оказывает существенное влияние не только на околоземное космическое пространство, но и на Землю. В частности, так называемые коротящие области взаимодействия, формируемые в солнечной короне, могут приводить к возникновению слабых и умеренных геомагнитных бурь (Ермолаев и др., 2018).

В последнее время большой интерес вызывают вопросы, связанные с магнитным полем КД (Хейнеманн и др., 2018; Хофмейстер и др., 2017, 2019). В первую очередь, это объясняется тем, что до сих пор нет ясных представлений о том, каким образом происходит ускорение солнечного ветра (Кранмер, 2002, 2009). Считается, что его скорость тесно

связана не только с площадью КД (Нольте и др., 1976; Шугай и др., 2009; Раттер и др., 2012; Акияма и др., 2013; Ахтемов, Цап, 2018), но и с величиной магнитного поля в них. В частности, обнаружена корреляция с усредненным значением поля КД и темпом уменьшения его напряженности с высотой, характеризуемым сверхрадиальным расширением потоковой трубки (Ванг, Шили, 1990; Коджима и др., 2007; Ванг, 2010; Фуджика и др., 2015).

Сравнительно недавно Хейнеманн и др. (2018), исследуя в течение восьми месяцев 2012 г. по данным инструментов Atmospheric Imaging Assembly (AIA) и Helioseismic and Magnetic Imager (HMI), размещенных на спутнике Solar Dynamics Observatory (SDO), эволюцию одной из долгоживущих низкоширотных КД, пришли к заключению о существовании высокой корреляции (коэффициент Пирсона $R = -0.82$) между площадью и усредненным фотосферным магнитным полем КД. Этот вывод несколько противоречит более ранним статистическим результатам для разных КД (см., например, Биленко, Тавастшерна, 2017). Между тем полученная оценка имеет большое феноменологическое значение, поскольку он предполагает, что изменения магнитного поля внутри КД определяют их эволюцию.

Хейнеманн и др. (2018) выделяли границы КД, исходя из принятого авторами пороговой интенсивности излучения относительно медианного значения для солнечного диска в канале AIA/SDO

*Электронный адрес: azis@crao.crimea.ru

193 Å. Между тем определение границ КД является довольно сложной и неоднозначной задачей вследствие неоднородности атмосферы и зачастую малой контрастности КД по сравнению с соседними спокойными областями Солнца. Значимую роль играет и то обстоятельство, что на изображениях солнечного диска в разных длинах волн, формируемых приблизительно на одной высоте в переходной области и нижней короне, площади КД могут существенно различаться (Гартон и др., 2018). Определение границ усложняется еще и наложением на низкоширотные КД более ярких и более темных образований, таких как стримеры, джеты, корональные петли и волокна.

Таким образом, методика определения границ КД в работе Хейнеманна и др. (2018), хотя и следует из анализа самых контрастных ультрафиолетовых изображений КД, получаемых на AIA/SDO, тем не менее представляется слишком упрощенной. Более обоснованным выглядит подход, предложенный Гартоном и др. (2018). Разработанный этими авторами метод автоматического обнаружения и выделения КД с помощью программного алгоритма Coronal Hole Identification via Multi-thermal Emission Recognition Algorithm (CHIMERA), позволяет определять контуры границ КД по трем каналам AIA/SDO 171, 193 и 211 Å в крайнем ультрафиолетовом излучении ионов железа, которым соответствуют характерные температуры плазмы 6.3×10^5 , 1.6×10^6 и 2.0×10^6 К (Лемен и др., 2012). При этом особо хотелось бы подчеркнуть, что в алгоритме также учитывается степень открытости конфигурации магнитного поля вплоть до $2.5R_{\odot}$, согласно модели Potential Field Source Surface Model (PFSS), использующей в качестве входных данных магнитограммы HMI/SDO в фотосферной линии FeI 6173 Å.

Цель настоящей работы — исследовать на основе алгоритма CHIMERA связь между площадью и магнитным полем долгоживущей низкоширотной КД при пересечении ее “центра тяжести” нулевого (центрального) меридиана. Затем сравнить полученные результаты с соответствующей зависимостью из работы Хейнеманна и др. (2018). В заключение обсудить следствия проведенного анализа и предложить возможную интерпретацию.

СВЯЗЬ МЕЖДУ ПЛОЩАДЬЮ И МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ КД ПО ДАННЫМ CHIMERA

Как и в работе Хейнеманна и др. (2018), мы выбрали период с 15.02.2012 по 14.10.2012 г. (кэррингтоновские обороты CR2121–CR2129), соответствующий второй фазе роста солнечной активности 24-го цикла. В это время на диске

Солнца наблюдалась долгоживущая изолированная сравнительно компактная КД в области низких широт (рис. 1), что позволило минимизировать проекционные эффекты. Величины усредненных площадей A_{CH} и продольного магнитного поля B_{CH} мы определяли при прохождении “центра тяжести” КД через нулевой меридиан 15.02.2012, 13.03.2012, 09.04.2012, 06.05.2012, 03.06.2012, 30.06.2012, 26.07.2012, 22.08.2012, 18.09.2012 и 14.10.2012. Однако, в отличие от Хейнеманна и др. (2018), разработавших собственный алгоритм, следующий из анализа AIA-изображений диска Солнца в наиболее контрастной линии 193 Å и принятого порогового значения 35% от медианной интенсивности солнечного диска, мы привлекли программный алгоритм CHIMERA, описанный в работе Гартона и др. (2018) и находящийся в свободном доступе (<https://github.com/TCDSolar/CHIMERA>) для практического использования. В качестве входных данных для выбранного промежутка времени мы использовали четыре fits-файла из архива SDO: HMI-магнитограмму и три AIA-изображения в каналах 171, 193 и 211 Å. С помощью программы строились изображения диска Солнца с границами КД и создавался текстовый файл, содержащий информацию о координатах “центра тяжести” (геометрического центра), площади и средней напряженности продольного магнитного поля в основании КД на уровне фотосферы. При каждом прохождении “центром тяжести” КД нулевого меридиана строилось пять изображений КД, заключенных в пределах $\pm 7^\circ$ по долготе, что соответствует приблизительно ± 15 ч. Использование нескольких изображений КД позволяло уменьшить геометрические искажения и увеличить точность измерений. Полученные таким образом данные затем усреднялись и использовались нами в качестве величин, характеризующих КД в момент прохождения центрального меридиана. Такой подход можно считать оправданным, если за указанный промежуток времени параметры КД существенно не меняются. Отметим, что Хейнеманн и др. (2018) радиальное магнитное поле выделенной КД также находили в результате усреднения данных, но в пределах ± 18 ч от момента прохождения “центром тяжести” КД нулевого меридиана. В течение отмеченного периода наблюдений контуры КД по данным CHIMERA оставались в пределах $\pm 50^\circ$ по широте и $\pm 30^\circ$ по долготе.

Связь между площадью КД и усредненным магнитным полем в ней, следуя Хейнеманну и др. (2018), мы характеризовали линейным коэффициентом корреляции Пирсона R , определяемого с помощью стандартных обозначений хорошо известным образом (см., например, Айвазян, 1968;

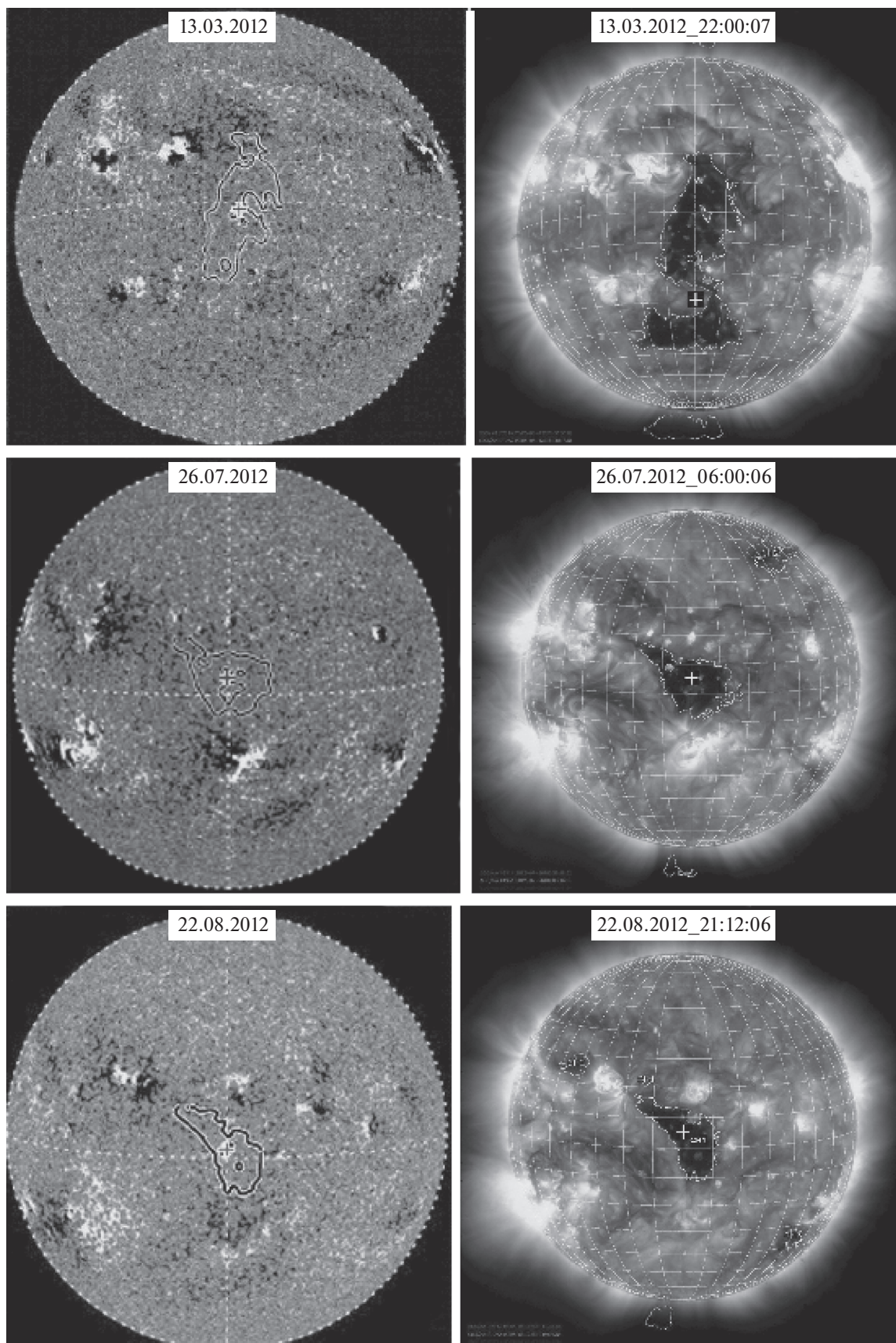


Рис. 1. Слева: магнитограммы HMI/SDO с нанесенными контурами КД из работы Хейнemann и др. (2018). Справа: синтезированные изображения AIA/SDO в каналах 171, 193 и 211 Å после определения границ КД с учетом PFSS, согласно алгоритму CHIMERA (Гартон и др., 2018).

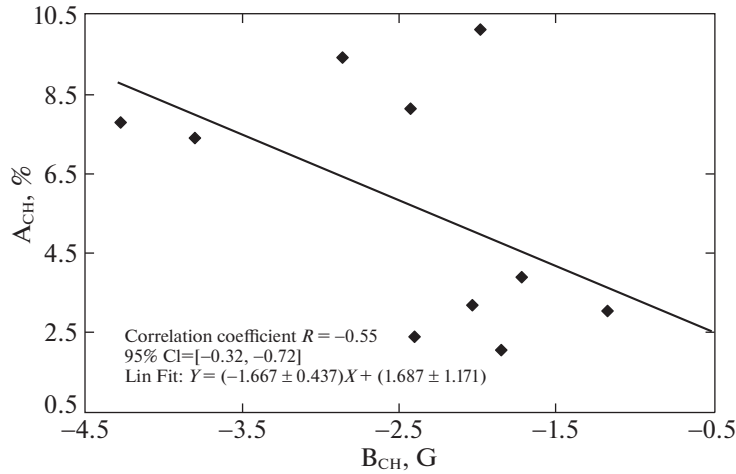


Рис. 2. Зависимость между усредненной площадью A_{CH} и продольным магнитным полем B_{CH} КД по данным алгоритма CHIMERA. Площадь A_{CH} выражена в процентах от площади диска Солнца.

Гмурман, 1972):

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}. \quad (1)$$

Учитывая малый объем выборки n , для оценки доверительного интервала CI мы использовали Z-преобразование Фишера (Айвазян, 1968)

$$Z = \text{arth}R = 0.5 \ln \left(\frac{1 + R}{1 - R} \right).$$

В этом случае нижняя (Z_L) и верхняя (Z_U) границы соответственно равны (Айвазян, 1968)

$$Z_L = \text{arth}R - \frac{t_\gamma}{n - 3} - \frac{R}{2(n - 1)}, \quad (2)$$

$$Z_U = \text{arth}R + \frac{t_\gamma}{n - 3} - \frac{R}{2(n - 1)}.$$

Для заданной доверительной вероятности γ квантиль t_γ вычислялся из уравнения $\Phi(t_\gamma) = \gamma/2$, где функция Лапласа

$$\Phi(t_\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{t_\gamma} e^{-x^2/2} dx.$$

Тогда, как следует из (2), коэффициент корреляции должен быть заключен в пределах

$$\text{th}Z_L < R < \text{th}Z_U, \quad (3)$$

где гиперболический тангенс

$$\text{th}Z = \frac{\exp(2Z) - 1}{\exp(2Z) + 1}.$$

На рис. 2 видна полученная нами с помощью алгоритма CHIMERA зависимость между усредненной площадью A_{CH} и продольным магнитным

полем низкоширотной КД B_{CH} для 10 точек, полученных в результате усреднения измерений вблизи центрального меридиана. Здесь же изображена линия регрессии и регрессионное уравнение. Согласно уравнению (1), коэффициент линейной корреляции Пирсона $R = -0.55$. Поскольку для доверительной вероятности $\gamma = 0.95$ значение $t_\gamma = 1.96$ (Гмурман, 1972), то с учетом (2) и (3) в этом случае доверительный интервал $CI = [-0.32, -0.72]$. Полученные оценки свидетельствуют о довольно слабой корреляции между площадью КД и средней напряженностью магнитного поля, что несколько противоречит результатам работы Хейнеманна и др. (2018), в соответствии с которыми при $\gamma = 0.95$ значение $R = -0.82$ и $CI = [-0.36, -0.97]$, т.е. сила связи между исследуемыми величинами является высокой.

Нам представляется, что полученное расхождение в результатах, в первую очередь, объясняется сильной зависимостью границ КД от методики их определения. На рис. 1 (верхняя панель) видно, как границы заметно варьируются, и разница в площадях, полученных Хейнеманном и др. (2018) A_{HE} и согласно алгоритму CHIMERA A_{CH} , может достигать 30% (рис. 3), хотя коэффициент корреляции $R = -0.87 \pm 0.17$. Между тем усредненные значения магнитного поля КД имеют меньший разброс. Это подтверждается результатами расчетов (рис. 4), в соответствии с которыми для усредненных магнитных полей B_{HE} и B_{CH} значение коэффициента $R = 0.90 \pm 0.15$. Отметим, что приведенные оценки R согласуются со сделанным ранее предположением (Ахтемов и др., 2020) о более сильной зависимости магнитного потока КД от их площади, чем от напряженности.

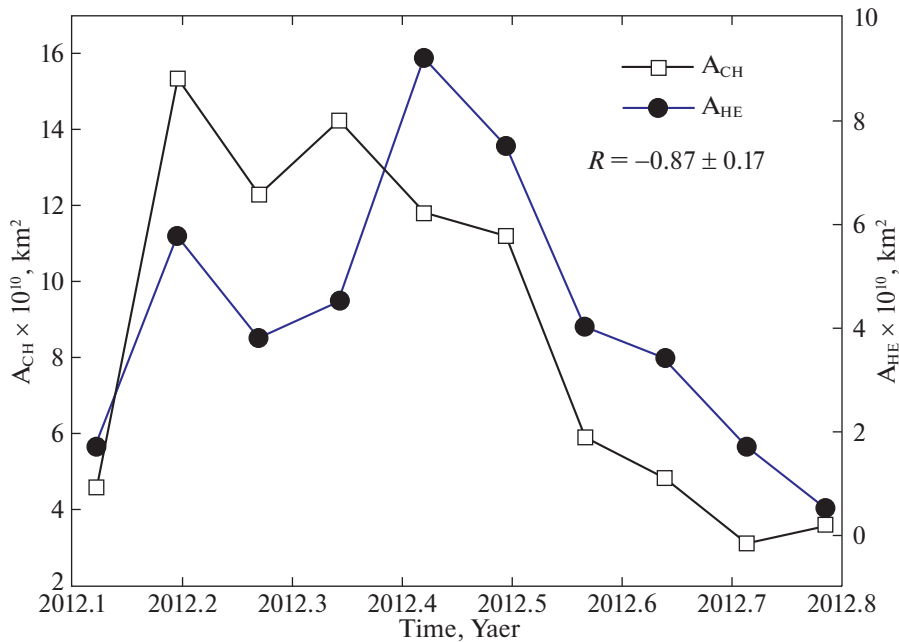


Рис. 3. Зависимость от времени усредненных площадей КД по данным Хейнеманна и др. (2018) A_{HE} и алгоритма CHIMERA A_{CH} за период с 15.02.2012 по 14.10.2012 г. (CR2121-CR2129) при прохождении КД центрального меридиана.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

На основе спутниковых данных AIA/SDO и HMI/SDO, полученных с помощью алгоритма CHIMERA для выделенной КД, нам, в отличие от Хенеманна и др. (2018), не удалось обнаружить высокой корреляции между изменениями площади КД и значениями ее магнитного поля на уровне фотосферы в моменты прохождения центрального меридиана за период с 15.02.2012 по 14.10.2012 г. На наш взгляд, даже с учетом малого объема выборки это объясняется тем, что методики определения границ КД в работах Хенеманна и др. (2018) и Гартона и др. (2018) заметно различаются. В первом случае для выделения КД на солнечном диске использовался метод, основанный на изображениях в линии 193 \AA , тогда как во втором — многоволновые ультрафиолетовые наблюдения и, что особенно важно, магнитограммы HMI/SDO. Можно предположить, что одна из возможных причин столь значимых различий связана с тонкой структурой КД и наложением в области ее границы различных магнитных образований. На наш взгляд, вывод Хейнеманна и др. (2018) о существовании высокой силы связи между площадью КД и напряженностью магнитного поля должен быть пересмотрен. Это также предполагает необходимость разработки единых подходов к проблеме определения границ КД, поскольку иначе трудно будет избежать значительных погрешностей при

прогнозировании космической погоды и адекватной интерпретации явлений, связанных с КД.

Приведенные нами результаты предполагают, что изменения напряженности магнитного поля внутри КД на уровне фотосферы не оказывают определяющего влияния на эволюцию их площади. Данное заключение подтверждают, в частности, результаты работы Сакри и др. (2020), основанные на наблюдениях AIA/SDO, которые предполагают, что плотность и температура ультрафиолетовой плазмы в исследуемой нами КД практически не зависят от ее площади. Поскольку магнитное поле тесно связано с нагревом корональной плазмы, то это свидетельствует о слабых изменениях магнитного поля на корональных высотах. Откуда с учетом доминирующего вклада в магнитный поток КД мелкомасштабных элементов (Хофмейстер и др., 2017, 2019) можно предположить, что контуры КД должны быть тесно связаны с процессами в области границ. В результате перестановочного пересоединения (Шелке, Панде, 1984; Конг и др., 2018) может происходить перезамыкание между открытыми и закрытыми магнитными потоками в результате эволюции глобальных и локальных характеристик во внешней области КД, сопровождаемое изменением конфигурации поля и соответственно площадей КД.

Отметим, что в отличие от солнечных пятен, у которых напряженность магнитного поля увеличивается с ростом их площади (Брей, Лоухед, 1967; Наговицын и др., 2017; Обридко, Наговицын,

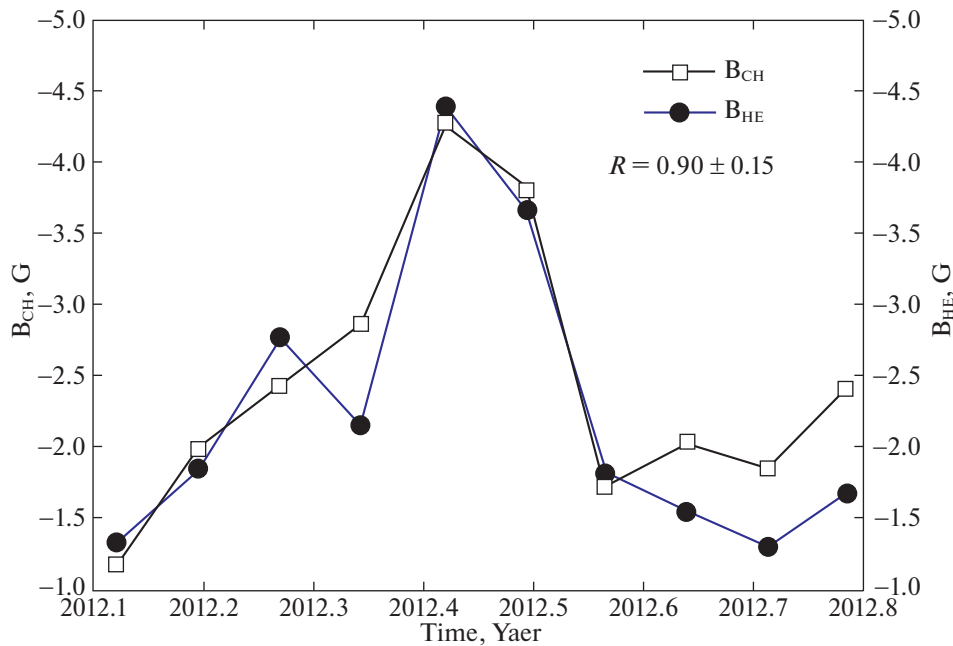


Рис. 4. Зависимость от времени усредненных значений магнитного поля КД по данным Хейнеманна и др. (2018) B_{HE} и алгоритма CHIMERA B_{CH} за тот же период, что и на рис. 3, при прохождении КД центрального меридиана.

2017), соответствующей закономерности для КД, нам обнаружить не удалось. Это свидетельствует о разной природе происхождения данных образований, вероятно, связанных с существенным различием в масштабах и высотах формирования этих магнитных структур.

Авторы выражают признательность рецензентам за внимательное прочтение статьи и сделанные полезные замечания, что немало способствовало ее улучшению. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Минобрнауки (НИР № 0831-2019-0006) и РФФИ (проект № 20-52-26006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айвазян С.А. *Статистическое исследование зависимостей* (М.: Металлургия, 1968).
2. Акияма и др. (S. Akiyama, N. Gopalswamy, S. Yashiro, and P. Makela), *Publ. Astron. Soc. Japan* **65**, id.S15 (2013).
3. Ахтемов, Цап (Z.S. Akhtemov and Yu.T. Tsap), *Geomag. Aeron.* **58**, 1149 (2018).
4. Ахтемов и др. (Z.S. Akhtemov, Y.T. Tsap, and V.I. Haneychuk), *Astrophysics* **63**, 399 (2020).
5. Биленко, Тавастшерна (I.A. Bilenko and K.S. Tavastsherna), *Geomag. Aeron.* **57**, 803 (2017).
6. Брей, Лоухед (R.J. Bray and R.E. Loughhead), *Sunspots*, London: Chapman and Hall Ltd. 1964.
7. Ванг (Y.-M. Wang), *Astrophys. J.* **715**, L121 (2010).
8. Ванг, Шили (Y.-M. Wang and N.R. Sheeley), *Astrophys. J.* **355**, 726 (1990).
9. Гартон и др. (T.M. Garton, P.T. Gallagher, and S.A. Murray), *J. Space Weather and Space Climate*, **8**, 02 (2018).
10. Гмурман В.С., *Теория вероятностей и математическая статистика* (М.: Высшая школа, 1972).
11. Ермолаев и др. (Yu.I. Yermolaev, I.G. Lodkina, N.S. Nikolaeva, M.Yu. Yermolaev, M.O. Riazantseva, and L.S. Rakhmanova), *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* **180**, 52 (2018).
12. Коджима и др. (M. Kojima, M. Tokumaru, K. Fujiki, H. Itoh, T. Murakami, and K. Hakamada), *New Solar Physics with Solar-B Mission* (Ed. K. Shibata, S. Nagata, T. Sakurai, San Francisco, ASP Conf. Ser. **369**, 2009), с. 549.
13. Конг и др. (D.F. Kong, G.M. Pan, X.L. Yan, J.C. Wang, and Q.L. Li), *Astrophys. J.* **863**, id.L22 (2018).
14. Кранмер (S.R. Cranmer), *Space Sci. Rev.* **101**, 229 (2002).
15. Кранмер (S.R. Cranmer), *Liv. Rev. Solar Phys.* **6**, 3 (2009).
16. Лемен и др. (J.R. Lemen, A.M. Title, D.J. Akin, P.F. Boerner, C. Chou, J.F. Drake, D.W. Duncan, Ch.G. Edwards, et al.), *Solar Phys.* **275**, 17 (2012).
17. Наговицын и др. (Y.A. Nagovitsyn, A.A. Pevtsov, and A.A. Osipova), *Astron. Nachr.* **338**, 26 (2017).
18. Нольте и др. (J.T. Nolte, A.S. Krieger, A.F. Timothy, R.E. Gold, E.C. Roelof, G. Vaiana, A.J. Lazarus, and J.D. Sullivan), *Solar Phys.* **46**, 303 (1976).

19. Обридко В.Н., Наговицын Ю.А., *Солнечная активность, цикличность и методы прогноза* (СПб: Изд-во ВВМ, 2017).
20. Раттер и др. (T. Rotter, A.M. Veronig, M. Temmer, and B. Vrsnak), *Solar Phys.* **281**, 793 (2012).
21. Сакри и др. (J. Saqri, A.M. Veronig, S.G. Heinemann, S.J. Hofmeister, M. Temmer, K. Dissauer, and Y. Su), *Solar Phys.* **295**, id.6 (2020).
22. Фуджика и др. (K. Fujiki, M. Tokumaru, T. Iju, K. Nakamada, and M. Kojima), *Solar Phys.* **290**, 2491 (2015).
23. Хейнеманн и др. (S.G. Heinemann, S.J. Hofmeister, A.M. Veronig, and M. Temmer), *Astrophys. J.* **863**, 29 (2018).
24. Хофмейстер и др. (S.J. Hofmeister, A. Veronig, M.A. Reiss, M. Temmer, S. Vennerstrom, B. Vrsnak, and B. Heber), *Astrophys. J.* **835**, id.268 (2017).
25. Хофмейстер и др. (S.J. Hofmeister, D. Utz, S.G. Heinemann, A. Veronig, and M. Temmer), *Astron. Astrophys.* **629**, id.A22 (2019).
26. Шелке, Панде (R.N. Shelke and M.C. Pande), *Bull. Astron. Soc. India* **12**, 404 (1984).
27. Шугай и др. (Yu.S. Shugai, I.S. Veselovsky, and L.D. Trichtchenko), *Geomagn. Aeron.* **49**, 415 (2009).