

Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 118, № 2, 20–27 (2022)

УДК 523.94, 523.98

Циклические вариации площадей корональных дыр и солнечных пятен в 2010–2021 гг.

О.А. Андреева, В.И. Абраменко, В.М. Малащук

ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, 298409, Крым
olga@crao.crimea.ru

Поступила в редакцию 3 ноября 2021 г.

Аннотация. В работе исследуется циклическая связь корональных дыр с индексами солнечной активности (solar activity – SA). На основе наблюдательных данных, полученных инструментом AIA/SDO в линии железа Fe XII 19.3 нм в период с 13.05.2010 по 13.05.2021, изучены свойства полярных и неполярных корональных дыр (coronal holes – CHs). Подробно рассмотрены особенности каждой группы, установлена связь площадей корональных дыр с фазой солнечного цикла. В исследуемый период обнаружена северо-южная (N–S) асимметрия полушарий как по индексам солнечной активности, так и по локализации максимальных площадей полярных и неполярных CHs. На протяжении всего цикла выявлена определяющая роль полярных CHs южного и неполярных CHs северного полушария, которая проявилась как в динамике SA полушарий, так и всего диска Солнца в целом.

Ключевые слова: Солнце, солнечный цикл, корональные дыры, солнечные пятна

1 Введение

Солнечная корона является источником очень динамичных событий (вспышки, корональные выбросы масс, солнечный ветер и др.), которые в основном происходят в активных областях (active regions – ARs) и корональных дырах. Тесная связь этих явлений отмечалась неоднократно (Bohlin, Sheeley, 1978; Sheeley, Harvey, 1981), и роль ARs в образовании и последующей эволюции CHs не вызывает сомнений. Тем не менее не до конца понятен механизм возникновения и эволюции полярных, средне- и низкоширотных CHs. В стандартной модели солнечного динамо (см., например, Hoynig, 1993) первоначально дипольное полоидальное поле в солнечном минимуме преобразуется дифференциальным вращением в сильное тороидальное поле, наблюдаемое в солнечном максимуме. Во время минимума активности области открытого поля над полюсами (полярные корональные дыры) достигают максимального расширения, а число низкоширотных областей замкнутого, сильного поля (активные области и солнечные пятна) минимально. По мере развития цикла активности появляются все больше солнечных пятен и полярные корональные дыры становятся меньше. Маленькие низкоширотные корональные дыры появляются в это время, но общая площадь Солнца, покрытая корональными дырами, уменьшается по мере того, как количество солнечных пятен увеличивается. Связь между этими двумя проявлениями магнитной эволюции Солнца была впервые исследована Bravo, Otaola (1989). Позже Bravo, Stewart (1994, 1997) показали, что существует тесная связь между эволюцией площадей полярных корональных дыр, оцененных по наблюдениям К-коронаметра, и числом солнечных пятен. Akhtemov et al. (2020) отмечают, что неполярные CHs могут вносить существенный вклад в общее магнитное поле Солнца. Это предполагает тесную связь неполярных CHs с работой глобального солнечного динамо.

Общепринято, что индексы солнечной активности – числа (SSN) и площади (S_{sp}) солнечных пятен – отражают 11-летнюю солнечную цикличность и, следовательно, связаны с работой солнечного динамо. С другой стороны, корональные дыры – области открытого потока, также отражают работу солнечного динамо. Для того чтобы статистически исследовать взаимосвязь между корональными дырами и солнечными пятнами, в представленной работе мы рассматриваем циклические вариации их площадей. Эта работа является продолжением цикла работ Andreeva et al. (2020), Andreeva, Malashchuk (2020) и др. по исследованию CHs, выполненных по наблюдениям AIA/SDO.

2 Данные наблюдений, статистика и методы исследования

Наше исследование базируется на данных наблюдений, полученных на протяжении 11 лет инструментом Atmospheric Imaging Assembly (AIA) на борту космического аппарата Solar Dynamics Observatory (SDO) в линии железа Fe XII 19.3 нм (сайт SolarMonitor.org¹). Поскольку на начало 24-го цикла этих данных еще не было, мы ограничились периодом с 13 мая 2010 по 13 мая 2021 года. Точное расположение таких крупномасштабных объектов, как СНs, может быть определено путем применения методов обработки изображений к данным крайнего ультрафиолетового излучения (EUV). Для отождествления СНs и определения их площадей мы воспользовались базой Heliophysics Event Knowledgebase (НЕК)² (Hurlburt et al., 2012). Информация о СНs находилась с помощью комплекса многоканальных алгоритмов нечеткой кластеризации SPoCA – Spatia Possibilistic Clustering Algorithm, подробно описанных в работах Barra et al. (2009) и Verbeeck et al. (2014). Они автоматически сегментируют солнечные изображения EUV в набор функций. SPoCA выделяет ARs, спокойное Солнце и СНs через минимизацию нечеткой внутриклассовой дисперсии, выполняет сегментацию до $0.99R_{\odot}$, исключая структуры вне диска. Используя НЕК, мы создали массив ежедневных суммарных площадей корональных дыр за период 13.05.2010 – 13.05.2021, выраженных в Mm^2 . В процессе исследования нами проанализировано 17717 СНs, из которых менее 7% пересекали экватор. Мы приняли, что площадь СН, пересекающей экватор, делится на 2 части, и каждая из них относится к соответствующей полусфере, в зависимости от ее местоположения. На наш взгляд, мы не сделали большой ошибки, потому что таких СНs было достаточно мало. С учетом этого допущения, в N-полусфере наблюдалось 9064, а в S – 8653 СНs. Как и в наших более ранних работах, здесь мы исследуем две группы СНs: полярные (CH_pol) и неполярные (CH_nonpol). CH_pol начинаются на полюсах, т.е. на широте 90 градусов, и опускаются, в зависимости от своего развития и фазы цикла, иногда до средних и даже низких широт. CH_nonpol – это средне- и низкоширотные СНs, не связанные с полюсом. Разделение СНs на 2 группы, которое мы приняли в нашем исследовании, подробно описывается в работе Andreeva et al. (2020). В таблице 1 приведены статистические данные по обработке СНs в период с 13.05.2010 по 13.05.2021.

Таблица 1. Статистика по обработке корональных дыр в период с 13.05.2010 по 13.05.2021

Года	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Всего
Дни наблюдений	233	364	366	365	365	365	357	365	365	365	366	133	4009
CH _s N-hem	418	539	1072	1336	1059	887	887	806	740	577	536	207	9064
CH _s S-hem	387	724	1189	1055	1041	855	707	685	628	597	545	240	8653
CH _s N_S_eq	23	107	270	190	117	174	96	102	78	17	0	8	1182
CH _s N_pol	190	229	230	203	301	251	411	452	485	495	478	163	3888
CH _s S_pol	267	409	375	171	289	397	364	425	437	506	501	150	4291
CH _s N_nonpol	228	310	842	1133	758	636	476	354	255	82	58	44	5176
CH _s S_nonpol	120	315	814	884	752	458	343	260	191	91	44	90	4362
All CH _s	805	1263	2261	2391	2100	1742	1594	1491	1368	1174	1081	447	17717

Примечание. В верхней строке перечислены года исследуемого периода. Во второй – число дней наблюдений СНs, которые анализировались в каждом году. Ниже представлена ежегодная информация по числу СНs для северной (CHs N-hem) и южной (CHs S-hem) полусфер, а также по числу СНs, пересекающих экватор (CHs N_S_eq). В следующих строках таблицы 1 приведена ежегодная статистика по числу полярных (CHs N_pol, CHs S_pol) и неполярных (CHs N_nonpol, CHs S_nonpol) СНs для северной и южной полусфер соответственно. Самая нижняя строка (All CHs) – суммарное за год количество СНs, зарегистрированных на всей видимой поверхности Солнца. Правая колонка (Всего) отражает суммарное количество соответствующих каждой строке величин за весь исследуемый период.

Таблица 1 показывает, что статистический объем представленного материала достаточно обширный и дает основания для изучения взаимосвязи циклических вариаций разных типов СНs с индексами солнечной активности (SSN и Ssp).

¹ <https://solarmonitor.org/index.php>

² http://www.lmsal.com/hek/hek_isolsearch.html

3 Циклические вариации площадей корональных дыр и солнечных пятен

3.1 Вариации индексов солнечной активности

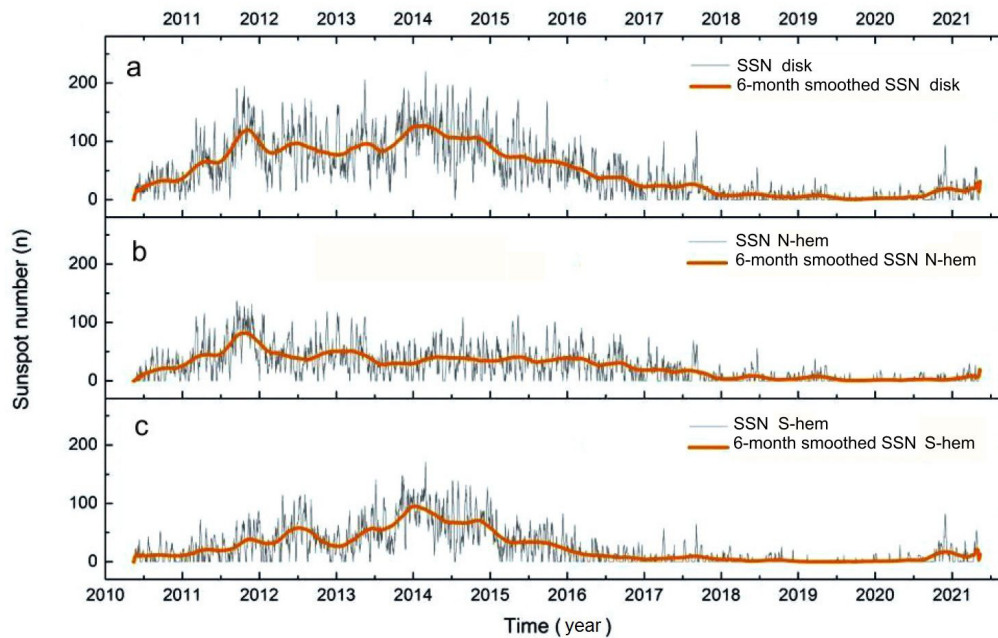


Рис. 1. Вариации индекса числа солнечных пятен в период с 13.05.2010 по 13.05.2021 для всего диска Солнца (а), для N- (b) и S- (c) полушфер

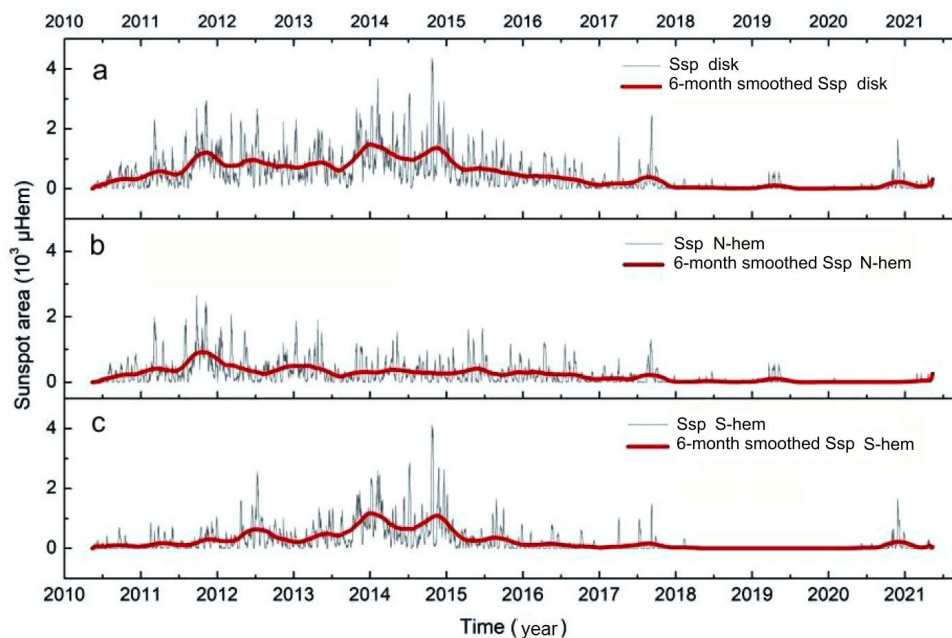


Рис. 2. Вариации площадей солнечных пятен в период с 13.05.2010 по 13.05.2021 для всего диска Солнца (а), для N- (b) и S- (c) полушфер

На рисунках 1 и 2 представлены вариации индексов солнечной активности SSN и Ssp в период с 13.05.2010 по 13.05.2021. На всех графиках этих рисунков и далее на рис. 3 тонкие серые кривые – ежедневные суммарные значения соответствующих величин; цветные толстые кривые на их фоне – данные, сглаженные за полгода.

Данные о SSN и Ssp взяты с сайтов WDC-SILSO³ и Solar Cycle Science⁴. Оба индекса показывают похожую тенденцию в динамике циклического распределения пятнообразования. На обоих рисунках наблюдается северо-южная асимметрия в распределении индексов. Известно, что в 24-м цикле было два пика максимума солнечной активности. Видно, что первый пик (2012 года) определен северным полушарием, а второй пик (2014 года) вызван пятенной активностью южного полушария. Для нашей задачи мы посчитали более физичным сравнение площадей CHs (Sch) со вторым индексом SA – площадями солнечных пятен.

3.2 Вариации ежедневных суммарных площадей CHs

Временные вариации ежедневных суммарных площадей CHs за исследуемый период представлены на рис. 3. Мы рассматривали циклические вариации CHs на всей видимой поверхности диска

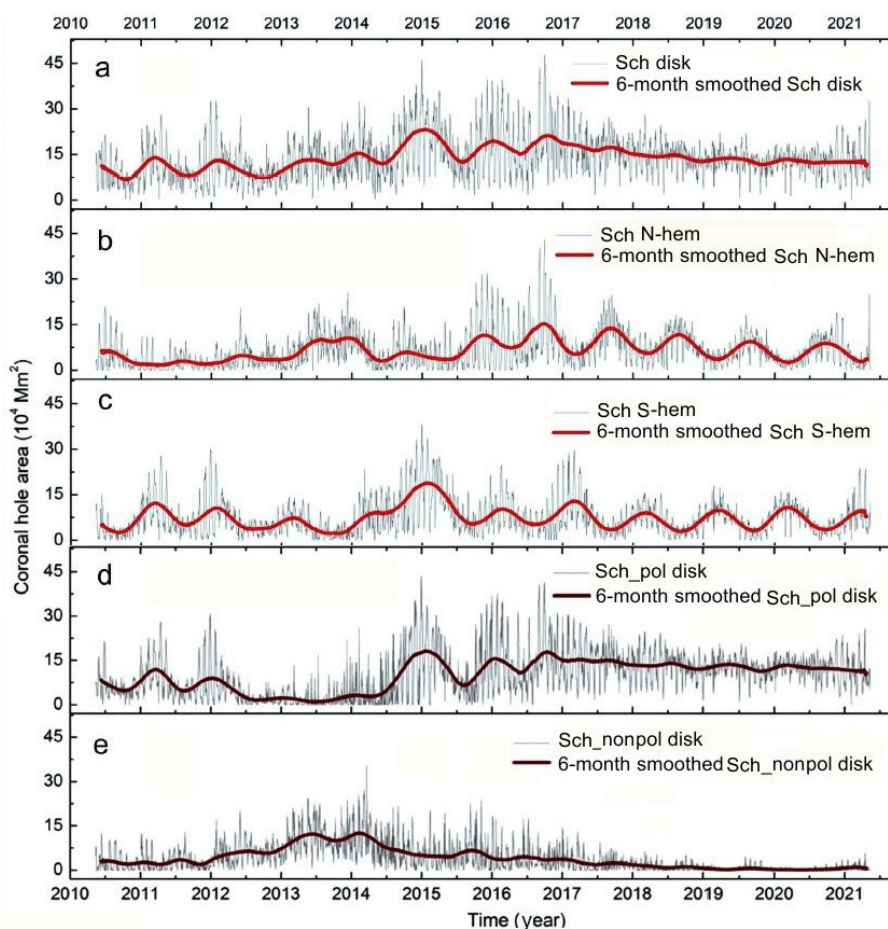


Рис. 3. Вариации ежедневных суммарных площадей корональных дыр в период с 13.05.2010 по 13.05.2021. На панелях сверху вниз показаны: (a) Sch всей видимой поверхности Солнца; Sch N- (b) и S- (c) полушфер; Sch всех полярных (d) и всех неполярных (e) видимой поверхности Солнца

Солнца, отдельно в каждой полушфере, и вклад двух типов CHs в общую динамику SA в рассматриваемый период. Это отражено на панелях (a–e) рис. 3. Здесь сразу следует отметить, что видимые квазипериодические колебания на рис. 3b, c – это артефакт, обусловленный наклоном оси вращения Солнца. Он проявляется в полушферах и отсутствует в суммарных площадях CHs по всему диску (рис. 3a). Видно, что на протяжении цикла полушария работали по-разному. Наблюдаются ярко

³ <https://wwbis.sidc.be/silso/datafiles>

⁴ http://solarcyclescience.com/AR_Database/daily_area.txt

выраженные пики доминирования полусфер по площадям CHs. На фазе роста в 2011–2012 гг. и в 2015 году по максимуму площадей CHs лидировало южное полушарие. Во втором максимуме и на ветви спада преобладало северное.

На рис. 3d, е показано разделение всех площадей исследуемых CHs на площади полярных (Sch_pol) и неполярных (Sch_nonpol) CHs. Наблюдается 2 максимума Sch_pol, которые приходятся на 2011–2012 и 2015 годы – фазы роста и спада SA. После фазы спада и в минимуме 24–25-го циклов суммарные площади полярных CHs приближаются к среднему уровню значений – около 14×10^4 Мм². В то же время максимумы Sch_nonpol согласуются с фазой второго максимума 24-го цикла 2013–2014 гг. Мы видим, что суммарные площади неполярных CHs в начале исследуемого периода имеют низкие значения, а на спаде и в минимуме 24–25-го циклов практически исчезают и появляются на ветви роста 25-го цикла. Они также повторяют цикл, как это было показано на панелях (а) рисунков 1 и 2 для солнечных пятен.

В то время как на фазе роста и первого максимума в северном полушарии все Sch (рис. 3b) были минимальны, пятенная активность – ярко выражена (см. рис. 1b и 2b). Но что интересно, и мы это отмечали в наших более ранних работах (Andreeva, Malashchuk, 2020), где мы еще не делили CHs на полярные и неполярные: во втором максимуме и на ветви спада 2014–2015 гг. южное полушарие лидировало как по Sch (см. рис. 3c), так и по SSN и Ssp (панели (c) рисунков 1 и 2).

3.3 Вариации площадей двух типов корональных дыр и солнечных пятен в полусферах

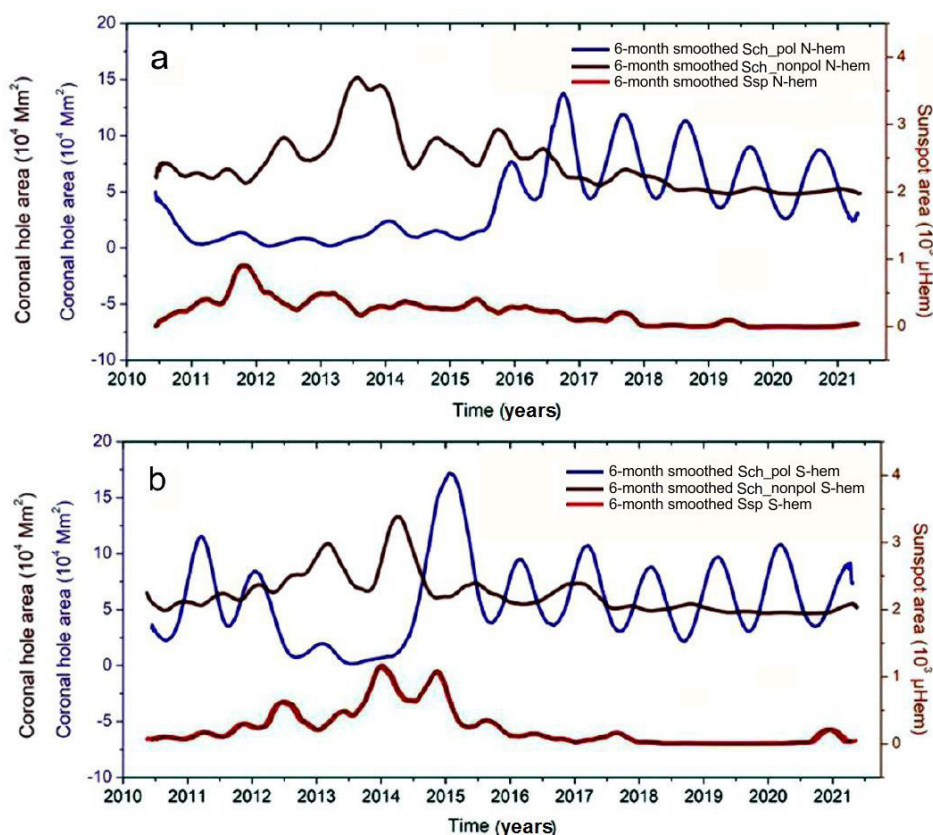


Рис. 4. Вариации площадей двух типов корональных дыр и солнечных пятен в период с 13.05.2010 по 13.05.2021 в N- (a) и S- (b) полусферах. Синим и коричневым цветом показаны площади полярных и неполярных CHs, красным – площади солнечных пятен

В ходе исследования связи CHs с солнечными пятнами, мы рассмотрели, какой вклад вносят полярные и неполярные CHs в динамику SA на протяжении цикла. Далее мы сравнили циклические вариации Sch_pol, Sch_nonpol и Ssp. На рис. 4 показано изменение во времени площадей полярных и неполярных CHs и площадей солнечных пятен для двух полусфер.

В то время как в первом максимуме 2012 года по площадям пятен лидировало северное полушарие (рис. 4а), Sch_{pol} были минимальны практически до начала фазы спада 24-го цикла (октябрь 2014). Южное полушарие (рис. 4б) лидировало по площадям пятен во втором максимуме, а максимумы Sch_{pol} наблюдались на фазах роста, спада и минимума SA. Ssp минимальные в начале цикла, после фазы спада и в минимуме SA (красные кривые на рис. 4а, б), а Sch_{pol} в это время имеют достаточно высокие стабильные значения (синие кривые рис. 4а, б).

Ежедневная суммарная площадь полярных СНs увеличивается в минимумах солнечной активности и снижается в максимуме цикла.

Для неполярных СНs в обоих полусферах (коричневые кривые рис. 4а, б) отмечается тенденция увеличения площадей на фазе роста и максимума SA, уменьшения – на фазах спада и минимума.

Глядя на две панели рис. 4, можно увидеть некоторые интересные закономерности в доминировании каждого типа СНs в разных полушариях. Так, например, хорошо просматривается *определяющая роль полярных СНs южного полушария* (синяя кривая на рис. 4б). Яркие пики около 2011, 2012 и 2015 гг. повторяются в картинах общей площади *всех полярных СНs, всех СНs южного полушария и всех СНs видимой поверхности диска Солнца* (см. рис. 3d, с и а соответственно). С другой стороны, можно отметить *особую роль неполярных СНs северного полушария* (коричневая кривая на рис. 4а), площадь которых велика в 2013–2014 гг. Они также повторяются в общей картине для *всех неполярных СНs, всех СНs северного полушария и всех СНs видимой поверхности диска Солнца* (рис. 3e, b, а соответственно).

4 Результаты

Мы подробно рассмотрели особенности поведения *полярных* и *неполярных* корональных дыр на протяжении 11-летнего цикла. Установили связь площадей корональных дыр с фазой солнечного цикла. Анализ двух типов корональных дыр в период с 13.05.2010 по 13.05.2021 показал:

1. Ежедневная суммарная площадь *полярных* корональных дыр увеличивается в минимумах солнечной активности и снижается в максимуме цикла. Это согласуется с общим представлением о полярных корональных дырах как основном источнике дипольного магнитного поля Солнца (Ikhsanov, Ivanov, 1999; Hess Webber et al., 2014; Bilenko, Tavastsherna, 2016).
2. В то же время *неполярные* корональные дыры повторяют цикл. Это еще раз подтверждает наше предположение о том, два типа СНs имеют разную природу. А *неполярные* СНs меняются квазисинхронно с пятенной активностью Солнца, что позволяет предположить наличие физической связи этих двух явлений.
3. Обнаружена северо-южная асимметрия полушарий как по индексам солнечной активности, так и по локализации максимальных площадей *полярных* и *неполярных* СНs.
4. Выявлена определяющая роль *полярных* СНs южного и *неполярных* СНs северного полушарий, которая проявилась как в динамике SA полушарий, так и всего Солнца в целом.

Благодарности. Авторы выражают благодарность референту за поддержку и интерес к статье, за ряд полезных замечаний.

SDO является проектом программы NASA Living With a Star. Данные SDO/AIA были предоставлены центром Joint Science Operation Centre (JSOC). Авторы выражают благодарность команде проекта Heliophysics Event Knowledgebase (HEK) за возможность доступа к базам данных СНs.

Мы также благодарим WDC-SILSO (Королевская обсерватория Бельгии, Брюссель) за возможность использовать данные о числах солнечных пятен.

Литература

- Andreeva O.A., Abramenko V.I. and Malaschuk V.M., 2020. Astrophysics, vol. 63, no. 1, pp. 114–124, doi:10.1007/s10511-020-09619-2.
- Andreeva A.O., Malaschuk V.M., 2020. Geomagnetism and Aeronomy, vol. 60, no. 8, pp. 1093–1100.
- Akhtemov Z.S., TSap Y.T., Haneychuk V.I., 2020. Astrophysics, vol. 63, pp. 399–407.
- Barra V., Delouille V., Kretzschmar M., Hochedez J.-F., 2009. Astron. Astrophys., vol. 505, pp. 361–371.
- Bilenko I.A., Tavastsherna K.S., 2016. Solar Phys., vol. 291, pp. 2329–2352.
- Bohlin J.D., Sheeley N.R., Jr., 1978. Solar Phys., vol. 56, pp. 125–151.

- Bravo S., Otaola J.A., 1989. *Solar Phys.*, vol. 122, pp. 335–443.
- Bravo S., Stewart G.A., 1994. *Solar Phys.*, vol. 154, pp. 377–384.
- Bravo S., Stewart G.A., 1997. *Solar Phys.*, vol. 173, no. 1, pp. 193–198.
- Hess Webber S.A., Karna N., Pesnell W.D., Kirk M.S., 2014. *Solar Phys.*, vol. 289, no. 11, pp. 4047–4067.
- Hoyng P., 1993. *Astron. Astrophys.*, vol. 272, pp. 321–339.
- Hurlburt N., Cheung M., Schrijver C., et al., 2012. *Solar Phys.*, vol. 275, pp. 67–78.
- Ikhsanov R., Ivanov V., 1999. *Solar Phys.*, vol. 188, pp. 245–258.
- Sheeley N.R., Jr. & Harvey J.W., 1981. *Solar Phys.*, vol. 70, pp. 237–249.
- Verbeeck C., Delouille V., Mampaey B., De Visscher R., 2014. *Astron. Astrophys.*, vol. 561, id A29.

Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ. 118, № 2, 20–27 (2022)

Cyclic variations in the areas of coronal holes and sunspots in 2010–2021

O.A. Andreeva, V.I. Abramenko, V.M. Malashchuk

Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny 298409
olga@craocrimea.ru

Abstract. This paper investigates a cyclic relation between coronal holes (CHs) and solar activity (SA) indices. Based on observational data obtained with the SDO/AIA instrument in the Fe XII 19.3 nm line between May 13, 2010 and May 13, 2021, the properties of polar and nonpolar coronal holes are studied. The features of each group are considered in detail, and the relationship of CH areas with the phase of the solar cycle is established. During the period under investigation, a North-South (N-S) asymmetry of the hemispheres was detected both in the SA indices and in the localization of the maximum areas of polar and nonpolar CHs. The determining role of polar CHs of the southern hemisphere and nonpolar CHs of the northern hemisphere was revealed throughout the cycle, which manifested itself both in the dynamics of SA of the hemispheres and the solar disk in general.

Key words: Sun, solar cycle, sunspots, coronal holes