

КОРОНАЛЬНЫЕ ДЫРЫ В ПЕРИОД МАКСИМАЛЬНОЙ АСИММЕТРИИ 24 ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

О.А.АНДРЕЕВА, В.И.АБРАМЕНКО, В.М.МАЛАЩУК

Поступила 6 сентября 2019

Принята к печати 18 декабря 2019

Текущий 24-й цикл солнечной активности существенно отличается от предыдущих циклов по ряду параметров, в частности, по значительной асимметрии числа солнечных пятен (sunspots, Sp) во втором пике его максимума. В период с марта 2013 по декабрь 2015гг. наблюдалось существенное преобладание числа пятен в южной полусфере. Основной целью данной работы было выяснить поведение корональных дыр (coronal holes, CH) в этот период. Исследование базируется на анализе данных, зарегистрированных Atmospheric Imaging Assembly (AIA), канал 19.3 нм, на борту Solar Dynamic Observatory (SDO). С помощью двух методов обнаружения CH (упрощенный визуальный и Spatia Possibilistic Clustering Algorithm (SPoCA)) получены временные ряды ежедневных суммарных площадей CH для северного и южного полушарий Солнца. Обнаружено согласие обоих методов в оценке площадей CH. Сравнение полученных вариаций площадей CH с числами и площадями Sp, позволило выявить, что в рассматриваемый период в S-полусфере преобладает активность как по пятнам, так и по суммарной площади CH. При этом возрастанию площади CH примерно на полгода предшествует возрастание пятенной активности. Сделано предположение о том, что CH и пятна - это связанные элементы общей магнитной активности Солнца, что качественно согласуется с исследованиями комплексов активности. Дипольное полоидальное поле, в виде открытых полей CH, и тороидальное поле, в виде активных областей, зависят друг от друга на временных масштабах существенно короче солнечного цикла.

Ключевые слова: *Солнце: корональные дыры: северо-южная асимметрия: солнечная активность: солнечный цикл*

1. *Введение.* Современные динамо-теории рассматривают динамическую систему, состоящую из двух полушарий Солнца. Очень важным является вопрос: насколько синхронизированы процессы в северном (N) и южном (S) полушариях и существуют ли наблюдательные свидетельства различий действия динамо в двух полушариях? Основным свидетельством того, что имеются определенные различия между полушариями, является северо-южная (N-S) асимметрия солнечной активности (CA) [1]. Несмотря на длительные исследования, само явление N-S асимметрии и его природа до конца не выяснены. Для изучения этого феномена использовались различные индексы солнечной активности - индексы пятенной активности, солнечные вспышки, волокна, протуберанцы, радио- и гамма-всплески, излучение короны, магнитное поле

Солнца и др. Обзоры работ по исследованию N-S асимметрии содержатся в статьях [2-8]. Эти исследования показали, что N-S асимметрия сама по себе является некоторой фундаментальной характеристикой СА. Она также свидетельствует о различии других характеристик активности в двух полушариях в ходе 11-летнего и векового циклов активности.

Текущий 24-й цикл СА находится в своей завершающей стадии. И сейчас с уверенностью можно сказать, что этот цикл по ряду параметров отличается от последних циклов. Общеизвестно, что он имеет меньший максимум, чем предыдущие циклы. Данный солнечный цикл отличается относительно большой северо-южной асимметрией инверсии полярного поля: знак поля на северном полюсе изменился более чем на год раньше, чем на южном [8-12]. Наблюдается значительная асимметрия по числу солнечных пятен во второй фазе максимума этого цикла (светлый пик в 24-м цикле на рис.1 указан стрелкой).

Последний факт нас заинтересовал, и мы поставили задачу проанализировать: что происходит на Солнце с корональными дырами в этот период? Наблюдаются ли какие-то особенности, связанные СН в S-полусфере?

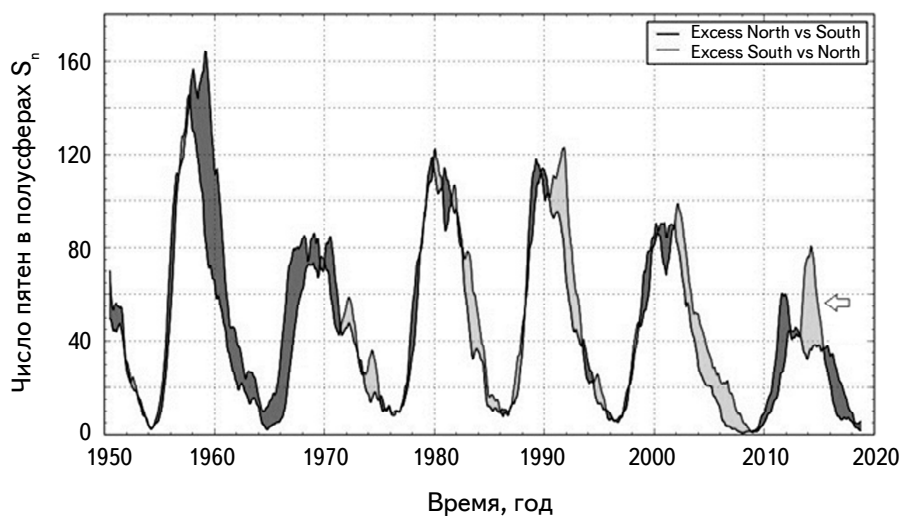


Рис.1. Северная и южная компоненты 13-месячного сглаженного числа солнечных пятен за последние пять циклов. Темный цвет заливки - доминирование по числу пятен северного полушария, светлый цвет - доминирование южного полушария.

2. Данные наблюдений и методы.

2.1. *Данные.* Наше исследование базируется на данных наблюдений, полученных инструментом SDO/AIA в линии железа (Fe XII 19.3нм) с марта 2013 по декабрь 2015гг. (сайт <https://solarmonitor.org/index.php>). Пример изображения дан на рис.2. В этот период число Sp в S-полусфере существенно

преобладало над Sp в N-полусфере (светлый пик на рис.1). Мы также использовали базы гелиофизических событий (Heliophysics Event Knowledgebase - НЕК) http://www.lmsal.com/hek/hek_isolsearch.html для локализации СН и определения их площадей.

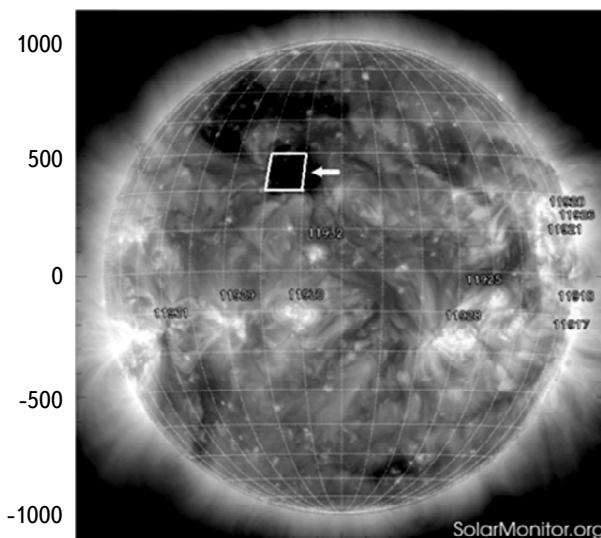


Рис.2. Изображение Солнца в линии железа Fe XII 19.3 нм, полученное SDO/AIA 20.12.2013г. Темные, с самой низкой интенсивностью, образования - СН, светлые - активные области. Стрелкой указана ячейка (10 x 10) квадратных гелиографических градусов - единица измерения СН визуальным методом.

Различные характеристики солнечной активности, проанализированные в нашем исследовании, были загружены с веб-сайтов:

- <http://sidc.oma.be/silso/monthlyhemisphericplot> - северная и южная компоненты 13-месячного сглаженного числа солнечных пятен за последние пять циклов по данным станции Uccle (Королевская обсерватория Бельгии) до 1991г. и сети номеров WDC-Sunspot с января 1992г. (рис.1).
- <http://sidc.oma.be/silso/datafiles#hemi> - ежедневные суммарные числа солнечных пятен для северной и южной полусфер (рис.3а, с).
- https://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch/daily_area.txt - ежедневные суммарные площади солнечных пятен (в единицах миллионных долей полусферы (μ Hem)) для северной и южной полусфер (рис.3b, d).

2.2. Методы. Корональные дыры играют важную роль в геомагнитной обстановке [13] и являются основными участниками в нарушениях космической погоды в периоды минимума солнечной активности. Термин СН обычно ассоциируется с областями одной доминирующей магнитной полярности с

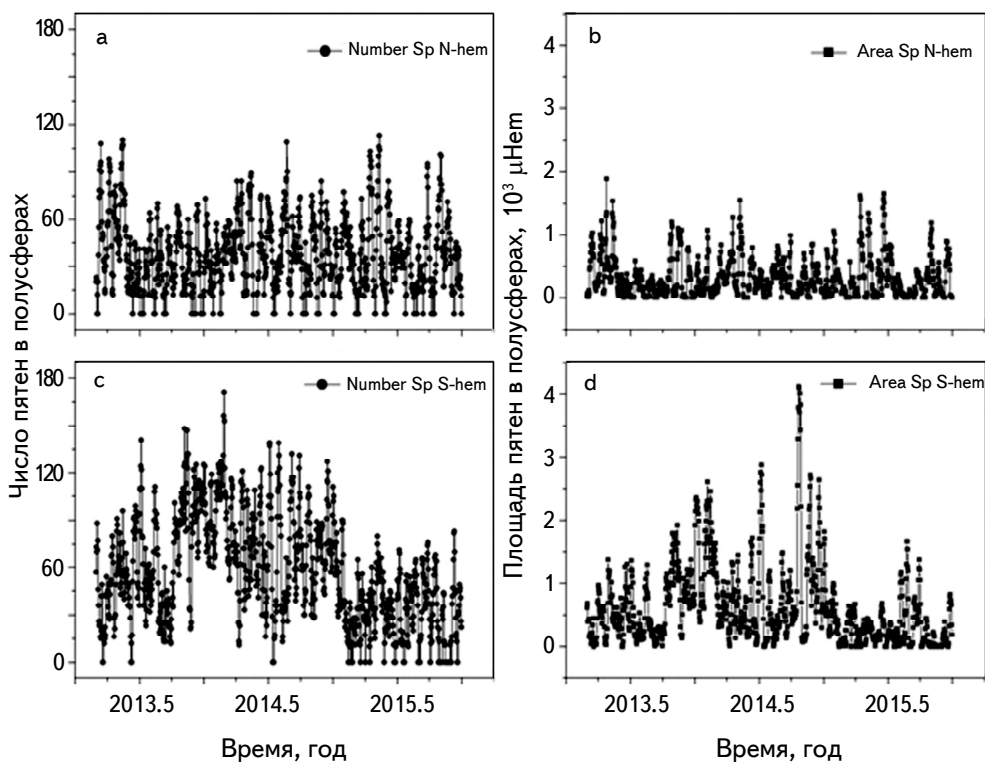


Рис.3. Ежедневные суммарные числа (a,c) и площади (b,d) солнечных пятен в (a,b) - северной и (c,d) - южной полушарах.

быстро расширяющимися открытыми силовыми линиями магнитного поля, вдоль которых частицы солнечного ветра улетают в межпланетное пространство [14,15]. СН являются источниками высокоскоростных потоков солнечного ветра. На экстремальных ультрафиолетовых (EUV) и рентгеновских снимках Солнца СН видны как темные участки в солнечной короне из-за их более низкой температуры и электронной плотности по сравнению с окружающей корональной плазмой [16]. По этой причине обнаружение СН в солнечных изображениях EUV является сложной задачей. В прошлом СН в основном определялись и отслеживались опытными наблюдателями (визуальный метод). Позже были предприняты многочисленные попытки автоматизировать процесс идентификации и обнаружения СН. Обзор основных методов обработки изображений, используемых в этих алгоритмах, представлен в [17]. Эти методы в основном базируются на различиях в интенсивности по сравнению с окружающей короной. Однако автоматизированное обнаружение СН по порогу интенсивности в одной длине волны (например, длина волны EIT 284 Å в [18,19]; или мягкие рентгеновские снимки [20,21]) является сложным из-за наличия волокон и переходных затемнений

аналогичного уровня интенсивности.

Огромный объем данных, полученных с помощью набора инструментов на SDO, потребовал создания новых алгоритмов для эффективной идентификация и получения доступа к данным. Одним из них является алгоритм пространственно-вероятностной кластеризации (Spatial Possibilistic Clustering Algorithm - SPoCA). Он представляет собой набор процедур сегментации, который позволяет выделить из EUV-изображения в области сходной интенсивности активные области (AR), СН и спокойное Солнце. Благодаря последним разработкам [22], появилась возможность идентифицировать волокна, отличая их от СН. В рамках командного проекта по поиску объектов, система обнаружения событий SDO запускает SPoCA для извлечения информации о СН из изображений AIA в полосе пропускания 19.3 нм и загрузки записей каждые четыре часа в базу знаний о событиях гелиофизики - НЕК [23]. Благодаря этим базам данных можно оперативно получить необходимые параметры исследуемых объектов: координаты, площадь и др. Эти записи доступны для поиска через графический интерфейс iSolSearch, программный пакет онтологии IDL Solarsoft и инструмент визуализации JHelioviewer (рис.4) [24].

В нашей работе мы получили площади СН двумя разными методами обнаружения СН. Визуальный, на основе пороговой интенсивности, и SPoCA-

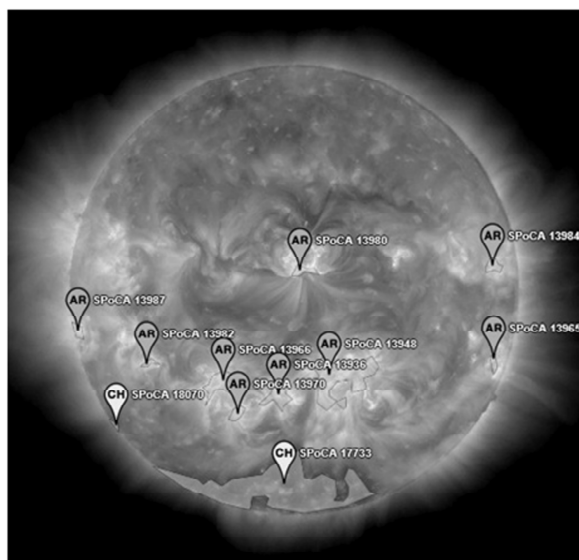


Рис.4. Активность Солнца в южной полусфере 12.09.2014г. Изображение Солнца в линии железа Fe XII 19.3нм, полученное SDO/AIA. Метками AR и СН указаны корональные дыры и активные области, обнаруженные методом SPoCA и визуализированные с помощью инструмента JHelioviewer. Единица измерения площадей СН методом SPoCA - Мм².

suite, основанный на нечеткой кластеризации значений интенсивности и подробно описанный в [25,26]. Далее были сопоставлены результаты расчетов (рис.5) и проведен анализ данных.

Метод 1 (M1). Визуальный (1.07.2013 - 31.12.2015гг.). На первом этапе мы максимально упростили задачу, и для оценки площадей, занятых СН на диске Солнца, воспользовались визуальным методом, как это делали раньше профессиональные наблюдатели. СН определялись по контрасту СН на границе со спокойным Солнцем и по интенсивности, характерной для СН. Площадь СН в этом методе измерялась произвольными единицами (arb. unit) - ячейками координатной сетки площадью в 100 квадратных гелиографических градусов. То есть общая площадь, занимаемая СН в каждом полушарии, определялась суммарным количеством ячеек, имеющих пониженную интенсивность изображения SDO/AIA 19.3нм (см. рис.2, белый квадрат). Ячейки, не полностью окрашенные в цвет соответствующей интенсивности, суммировались по полушарию и округлялись с точностью до половинных долей ячейки. Таким образом, был обработан весь материал за период 1.07.2013-31.12.2015г. Результат обработки методом M1 представлен на левой панели рис.5. Графики (а, с) демонстрируют изменение ежедневных суммарных площадей СН в N и S-полусфере, соответственно.

Метод 2 (M2). SPoCA (1.03.2013 - 31.12.2015гг.). Далее мы воспользовались описанной выше базой данных НЕК, для получения информации из архива AIA и доступа к каталогам СН. Инструментом для извлечения информации о СН, послужил комплекс процедур SPoCA. На рис.4 приведен пример такого изображения. Благодаря этим базам данных был получен массив площадей СН за период 1.03.2013-31.12.2015гг. (см. рис.5b, d). Единица измерения площадей в этом случае - Мм^2 .

2.3. Статистический объем данных. В процессе исследования нами обработано: по методу M1 - 912 дней наблюдений СН (1.07.2013-31.12.2015), по методу M2 - 1036 дней наблюдений в период с 1.03.2013 по 31.12.2015. Длина временного ряда для метода M1 на 3 месяца короче длины второго ряда, так как на сайте Solarmonitor.org не было соответствующих данных за период (1.03.2013 - 30.06.2013). Нами было проанализировано всего 5960 СН, из них 399 СН пересекали экватор. Зарегистрировано: в N-полусфере 3040 СН, в S-полусфере 2920 СН. Полярные СН наблюдались: в N-полусфере 503 дня, в S-полусфере 664 дня.

3. Анализ вариаций площадей СН, полученных методами M1 и M2. Сравнивая вариации ежедневных суммарных площадей СН, полученных двумя разными методами (см. рис.5, слева - метод M1 и справа - метод M2), можно увидеть согласие в оценке тенденции изменения исследуемых величин.

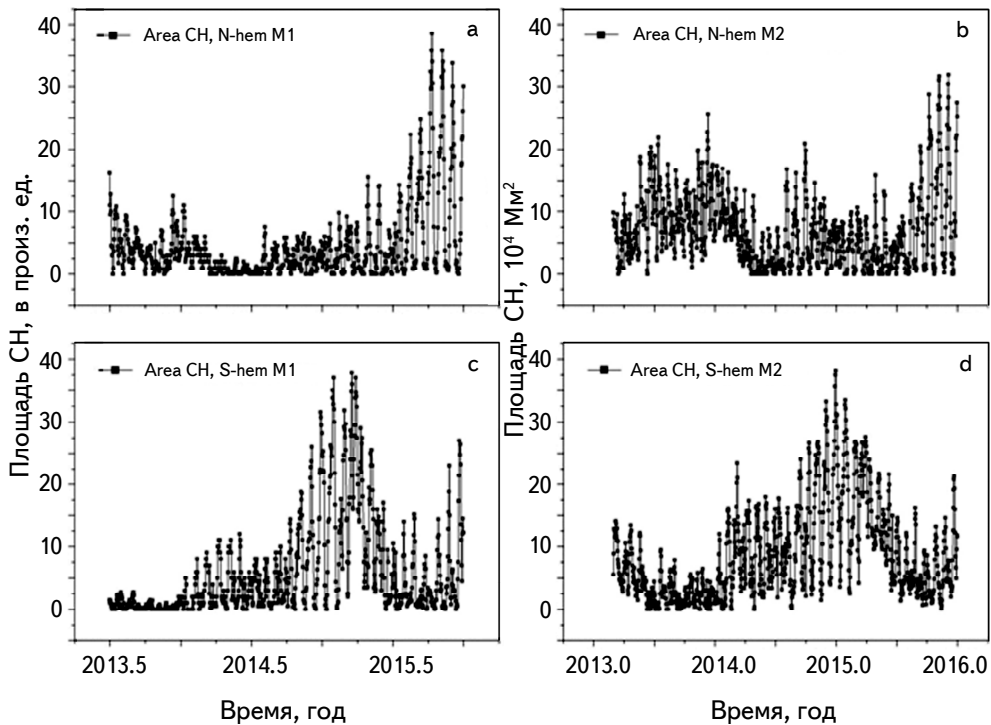


Рис.5. Суммарные за день площади СН, определенные двумя методами (слева - визуальным - M1, справа - SPoCA - M2) для северного (a,b) и южного (c,d) полушарий.

Рис.5с, d иллюстрирует, что обоими методами выявляется доминанта площади СН в южном полушарии в интервале (2014-2015.5). До 2014г. и после середины 2015г. площади, занимаемые СН, преобладали в северном полушарии, однако их максимальные амплитуды были меньше, чем в период (2014-2015.5) в S-полушарии. То есть, пик активности по СН во второй фазе максимума 24 цикла пришелся на 2015-й год в S-полусфере. На рис.5 также просматривается цикличность длительностью примерно в 1.5 года по доминированию СН в N и S-полусферах. В период (2013-2014.25) более активна N-полусфера, а в период (2014.25-2015.75) возрастает активность в S-полусфере, после чего доминирование активности опять смещается в N-полусферу.

4. *Сравнение вариаций площадей СН с характеристиками солнечной активности.* Мы сравнили вариации площадей СН, полученных по методу M2 с вариациями чисел и вариациями суммарных ежедневных площадей солнечных пятен.

На рис.6а видно, что числа Sp в N-полусфере меняются квазиравномерно и хаотично в пределах (0-115). При этом не наблюдается никакой корреляции с изменениями площадей СН (рис.6с). При сравнении левых панелей рис.6

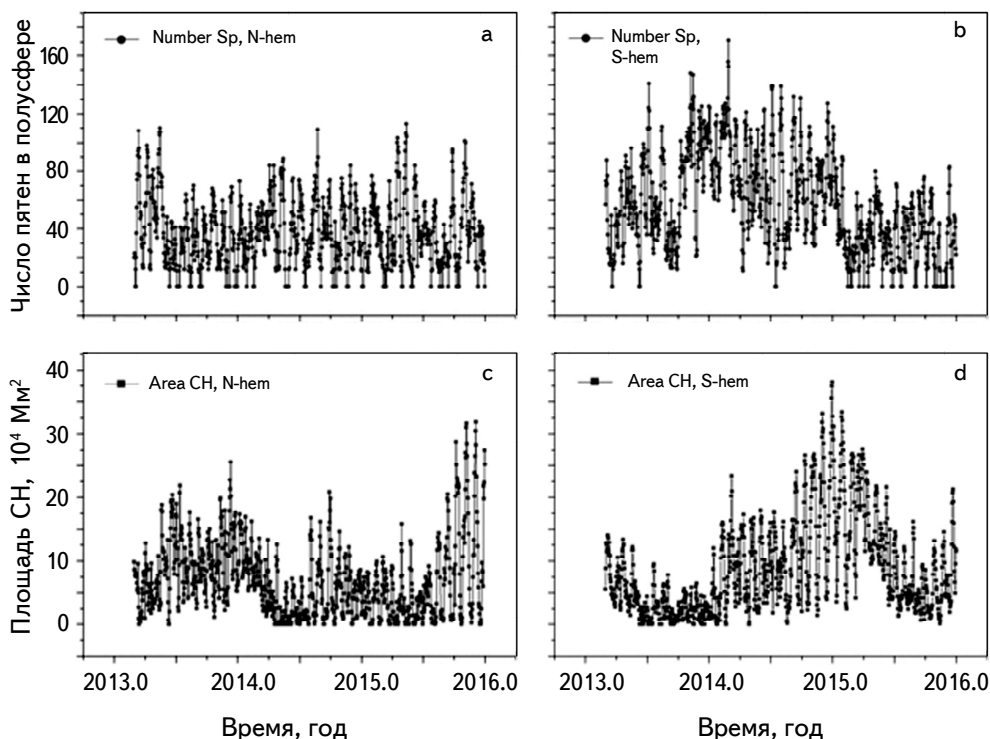


Рис.6. Временные вариации чисел солнечных пятен (a,b) и площадей СН (c,d) в полусферах: (a,c) - северного и (b,d) - южного полушарий.

(N-полушарие) с правыми (S-полушарие) становится очевидной более высокая активность S-полушария как по количеству Sp , так и по площади СН. Такой же вывод следует и из рис.7, где сравниваются площади пятен и площади СН.

Виден интервал (2014-2015.25), когда на диске Солнца в S-полусфере одновременно наблюдается как самый высокий уровень пятенной активности, так и подъем и максимум суммарной площади СН. При этом, сопоставление рис.6b и 6d дает основание предположить, что максимум числа Sp , примерно, на 0.5-0.75 года опережает максимум суммарной площади СН. N-полусфера при этом показывает низкий уровень активности как по пятнам, так и по СН (рис.6a, c и рис.7a, c).

Доминирование активности в S-полусфере наглядно проиллюстрировано на рис.4 и 8.

5. Выводы и обсуждение. Мы исследовали особенности поведения СН в период максимальной асимметрии 24-го цикла (2014-2015.25), определенной по показателю пятенной активности - числу Sp . Для обнаружения СН мы использовали два независимых метода: визуальный и метод, основанный

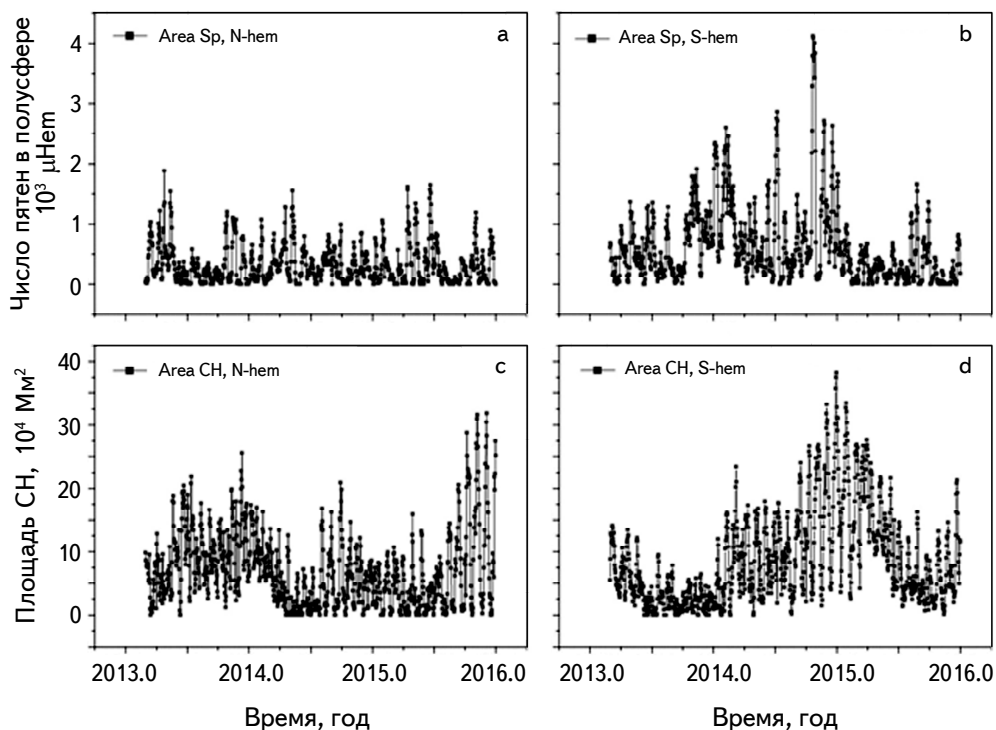


Рис.7. Временные вариации площадей солнечных пятен (a,b) и площадей CH (c,d) в полусферах: (a,c) - северного и (b,d) - южного полушарий.

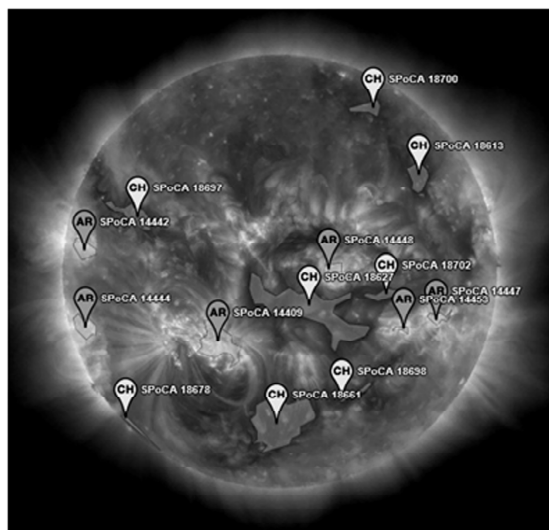


Рис.8. Изображение Солнца в линии железа Fe XII 19.3 нм, полученное SDO/AIA 21.10.2014г. Доминирование активности в южном полушарии как по CH, так и по AR хорошо заметно.

на нечеткой кластеризации значений интенсивности, Spatia Possibilistic Clustering Algorithm. Сравнивая вариации площадей СН, полученных этими методами, с вариациями таких солнечных характеристик как числа и площади солнечных пятен, мы получили следующие результаты:

- Оба метода позволили нам выявить в указанном временном интервале доминанту активности по СН в S-полусфере;
- В тот же период, ранее была выявлена другими авторами (см. рис.1), и нами здесь подтверждена доминанта по числу и площадям S_p ;
- Возрастание пятенной активности в S-полушарии предвещает возрастание суммарной площади СН в том же полушарии примерно на 0.5-0.75 года.

Мы подчеркиваем, что наш результат относится не только к большим СН, но и к низкоширотным изолированным СН, см. рис.8.

Из вышесказанного можно сделать выводы:

- Упрощенный визуальный метод обнаружения СН может быть использован для быстрого выявления тенденции изменения площадей СН.
- В период второго максимума 24 цикла в южном полушарии Солнца имело место квазисовременное преобладание активности как по пятнам (по числу пятен и площадям), так и по общей площади, занятой СН. По нашему мнению, это свидетельствует о том, что корональные дыры и пятна - это элементы общей магнитной активности. Существуют взаимосвязи между полями различных масштабов в процессе генерации цикла. Эти структуры ведут себя связанным образом на временных масштабах, на порядок меньших, чем солнечный цикл. Дипольное полоидальное поле, в виде открытых полей СН, и тороидальное поле, в виде активных областей, зависят друг от друга. Все это хорошо согласуется с выводами работы [27], где авторы также отмечают, что эволюция СН и активных областей является частью единого процесса.

Идея асимметрии - важная составляющая теории динамо. В классическом подходе, когда речь идет об асимметрии, говорят о количестве пятен, их площади и т.д., но не о СН. Наш результат показывает, что асимметрия - это более глубокое явление, которое проявляется даже на таких крупных структурах, как открытые магнитные поля, и проявляется она не через 11 лет, а в режиме реального времени, по ходу цикла.

Полученный нами результат требует дальнейшего исследования такого рода асимметрии в других циклах, на более длительных промежутках времени, раздельного исследования полярных и низкоширотных СН для того, чтобы получить больше информации для теории динамо.

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 Knowledge-base (НЕК) за возможность доступа к базам данных СН.

Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Крым,
Россия, e-mail: olga@craocrimea.ru

CORONAL HOLES DURING THE PERIOD OF MAXIMAL ASYMMETRY OF 24th SOLAR CYCLE

O.A.ANDREEVA, V.I.ABRAMENKO, V.M.MALASCHUK

The current 24th cycle of solar activity differs significantly from previous cycles by a number of parameters, in particular, by a significant asymmetry in the sunspots (Sp) number during the second peak of its maximum. From March 2013 to December 2015 there was a significant predominance of the sunspots number in the southern hemisphere. The main purpose of this paper was to clarify the behavior of coronal holes (CH) during this period. The study is based on an analysis of data acquired by Atmospheric Imaging Assembly (AIA), a 19.3nm channel on board Solar Dynamic Observatory (SDO). Two methods of CH detection (simplified visual method and Spatia Possibilistic Clustering Algorithm (SPoCA)) were applied to obtain time series of daily total areas of CHs for southern and northern hemispheres. The agreement between the methods was found. A comparison of the obtained variations of the areas of CH with numbers and areas of SP allowed us to reveal that during the time period of interest, the southern hemisphere dominates in sense of both sunspots activity and total CHs area. The sunspots activity is approximately a half-a-year followed by the CHs area enhancement. We suggest that CHs and sunspots are related ingredients of the whole solar magnetic activity, which is in agreement with studies of activity complexes. The dipole poloidal field, as open field of coronal holes, and the toroidal field, as active regions, are intrinsically related on time scales much shorter than the solar cycle.

Keywords: *Sun: coronal holes: north-south asymmetry: solar activity: solar cycle*

ЛИТЕРАТУРА

1. О.Г.Бадалян, Письма в Астрон. ж., **38**, 51, 2012.
2. *G.Vizoso, J.L.Ballester*, Astron. Astrophys., **229**, 540, 1990.
3. *M.Carbonell, R.Oliver, J.L.Ballester*, Astron. Astrophys., **274**, 497, 1993.
4. *K.J.Li, J.X.Wang, S.Y.Xiong et al.*, Astron. Astrophys., **383**, 648, 2002.
5. *J.Sýkora, J.Rybák*, Sol. Phys., **261**, 321, 2010.
6. *O.G.Badalyan, V.N.Obridko, J.Rybák et al.*, Astron. Zh., **82**, 740, 2005, (Astron. Rep., **49**, 659, 2005).
7. *O.G.Badalyan, V.N.Obridko, J.Sykora*, Sol. Phys., **247**, 379, 2008.
8. *O.G.Badalyan, V.N.Obridko*, New Astron., **16**, 357, 2011.
9. *L.Svalgaard, Y.Kamide*, Astrophys. J., **763**, 237, 2013.
10. *E.E.Benevolenskaya*, Geomagnetism and Aeronomy, **53**, 891, 2013.
11. *A.V.Mordvinov, S.A.Yazev*, Solar Phys., **289**, 1971, 2014.
12. *L.L.Kitchatinov, A.I.Khlystova*, Astron. Lett., **40**, 663, 2014.
13. *B.T.Tsurutani, W.D.Gonzalez, A.L.C.Gonzalez et al.*, J. Geophys. Res. [Space Phys.], **111**, A07S01, 2006.
14. *J.T.Gosling, V.J.Pizzo*, Space Sci. Rev., **89**, 21, 1999.
15. *S.R.Cranmer*, Sol. Phys., **6**, 3, 2009.
16. *R.H.Munroand, G.L.Withbroe*, Astrophys. J., **176**, 511, 1972.
17. *M.J.Aschwanden*, Sol. Phys., **262**, 235, 2010.
18. *V.Abramenko, V.Yurchyshyn, H.Watanabe*, Sol. Phys., **260**, 43, 2009.
19. *V.N.Obridko, B.D.Shelting, I.M.Livshits et al.*, Sol. Phys., **260**, 191, 2009.
20. *B.Vršnak, M.Temmer, A.M.Veronig*, Sol. Phys., **240**, 315, 2007.
21. *G.Verbanac, B.Vršnak, A.Veronig et al.*, Astron. Astrophys., **526**, A20, 2011.
22. *M.A.Reiss, S.J.Hofmeister, R.De.Visscher et al.*, J. Space Weather Space Clim., **5**, A23, 2015.
23. *N.Hurlburt, M.Cheung, C.Schrijver et al.*, Sol. Phys., **275**, 67, 2012.
24. *D.Müller, B.Fleck, G.Dimitoglou et al.*, Computing in Science and Engineering, **11**(5), 38, 2009.
25. *C.Verbeeck, P.Higgins, T.Colak et al.*, Sol. Phys., **283**, 67, 2011.
26. *C.Verbeeck, V.Delouille, B.Mampaey et al.*, Astron. Astrophys., **561**, A29, 2014.
27. *V.N.Obridko, B.D.Shelting*, Astron. Rep., **57**, 848, 2013.