

УДК 523.98

ВРАЩЕНИЕ ДОЛГОЖИВУЩЕЙ КОРОНАЛЬНОЙ ДЫРЫ В 24-м ЦИКЛЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2023 г. О. А. Андреева¹, *, В. М. Малащук¹, **

¹Крымская астрофизическая обсерватория РАН, пос. Научный, Крым, Россия

*e-mail: olga@craocrimea.ru

**e-mail: mvm@craocrimea.ru

Поступила в редакцию 06.03.2023 г.

После доработки 20.03.2023 г.

Принята к публикации 28.03.2023 г.

В работе обсуждаются результаты статистического исследования характеристик вращения долгоживущей гигантской корональной дыры. Исследование основано на данных наблюдений, полученных прибором Atmospheric Imaging Assembly в линии Fe XII 19.3 нм на борту космического аппарата Solar Dynamics Observatory в период с июня 2015 г. по март 2017 г. — 24 кэррингтоновских оборота. Рассмотрены отдельно четыре этапа развития корональной дыры: формирование, две фазы развитой корональной дыры и завершающая фаза. Установлено, что средняя скорость вращения на широте 40° близка к стандартной скорости в начале (12.75°/сут) и в первой фазе максимального развития (13°/сут); меньше — во второй фазе максимального развития (11.7°/сут) и в конце ее существования (12.5°/сут). Небольшое увеличение скорости на завершающем этапе связано с перестройкой корональной дыры. Согласно современным теориям, вращение солнечной короны отражает вращение подфотосферных слоев. Более высокие слои короны отражают вращение более глубоких слоев Солнца. Результаты, полученные в нашей работе, показывают, что скорость вращения гигантской корональной дыры, в максимальной фазе ее развития, больше скорости вращения диска Солнца. Возможно, это свидетельствует о том, что корональные дыры могут быть связаны с глубокими солнечными слоями через конфигурацию глобального магнитного поля и что источник образования корональных дыр находится более глубоко, чем источник фонового поля.

Ключевые слова: Солнце, корональные дыры, дифференциальное вращение, солнечная активность

DOI: 10.31857/S0016794023600412, **EDN:** OJWGVV

1. ВВЕДЕНИЕ

Корональные дыры (coronal holes, CHs) известны как крупномасштабные структуры в солнечной короне, характеризующиеся пониженной температурой, плотностью и “открытой” для межпланетного пространства топологией магнитного поля. Вдоль открытых силовых линий магнитного поля, плазма разгоняется до сверхзвуковых скоростей, образуя межпланетные высокоскоростные потоки солнечного ветра, выходящие за пределы нашей Солнечной системы и вызывающие геомагнитные бури всякий раз, когда они проносятся над Землей.

Хотя CHs были обнаружены уже в эпоху Скай-лэб 1973–1974 гг. и с этого времени началось их систематическое изучение [Krieger et al., 1973, Tousey et al., 1973; Glencross, 1974], источник их открытого магнитного потока и характер вращения пока остаются неясными. До сих пор ведутся споры о том, имеют ли CHs магнитные корни глубоко в зоне конвекции, индуцируется ли их от-

крытый магнитный поток истекающей плазмой солнечного ветра или их открытый магнитный поток просто состоит из обычных закрытых петель спокойного Солнца, открываемых некоторыми механизмами [Hiremath et al., 2022].

Общеизвестно, что Солнце — звезда с конвективной оболочкой и ее слои вращаются неравномерно как по широте, так и внутри нее. Для лучшего понимания солнечной активности необходимо представление о вращательной структуре слоев, как внутри, так на поверхности и в атмосфере Солнца. Скорость вращения внутренней части и поверхности связана со скоростью вращения солнечной атмосферы, особенно короны [Stepanian et al., 2007; Hiremath and Hegde, 2013]. Скорость поверхностного вращения определяется по наблюдениям углового перемещения относительно медленно изменяющихся деталей в солнечной атмосфере — таких, например, как пятна, факелы, флоккулы, темные волокна, хромосферная сетка, яркие точки, CHs и т.д. (так называемый метод трассеров) и по измерениям доплеров-

ских смещений спектральных линий в плазме на поверхности Солнца. Скорость вращения на поверхности Солнца максимальна на экваторе и уменьшается при приближении к полюсам. Скорость вращения внутри Солнца позволяет оценить гелиосейсмология. Внутри Солнца наблюдается дифференциальное вращение во внешней части конвективной зоны и почти равномерное вращение в зоне лучистого переноса. Угловая скорость вращения внутри Солнца, полученная по данным SDO/HMI [Larson and Schou, 2018] показана на рис. 1.

Переход между двумя областями называется тахоклином и находится на расстоянии примерно одной трети от поверхности Солнца.

И хотя есть согласие относительно скорости вращения в этих слоях, в то же время, с момента обнаружения СНs, нет единого мнения относительно закона скорости их вращения, вращаются ли эти образования жестко или дифференциально.

На основе обнаруженных СНs в различных спектральных линиях, и при использовании их в качестве трассеров, некоторые исследования [Shelke and Pande, 1985; Insley et al., 1995; Obridko and Shelting, 1989; Navarro-Peralta and Sanchez-Ibarra, 1994; Oghrapishvili et al., 2018] показывают, что СНs вращаются дифференциально. В большинстве других исследований [Bagashvili et al., 2017; Hiremath and Hegde, 2013; Japaridze et al., 2015; Prabhu et al., 2018; Timothy et al., 1975; Wagner, 1975, 1976] пришли к выводу, что СНs вращаются как твердое тело.

В ряде работ также исследуется характер вращения экваториальных и полярных СНs. Авторы заключают, что СНs на низких широтах вращаются дифференциально, а в приполярных областях жестко. Бадалян и др. [2006], Mancuso and Giordano [2011] обнаружили, что вращение СНs становится жестким выше $\pm 40^\circ$ широты. Используя данные SDO, авторы статьи [Bagashvili et al., 2017] статистически изучили широтное распределение скоростей вращения СНs. Оказалось, что скорость вращения СНs была равна скорости вращения тахоклина. Было высказано предположение, что магнитные поля СНs связаны с тахоклином и зонами нижней солнечной конвекции примерно на $0.71 R_\odot$ (см. рис. 1). Джапаридзе с соавторами в 2015 году по наблюдениям СНs в линии $10830 \text{ \AA}$ за 2003–2012 гг. показали, что скорость вращения СНs составляет $13.39^\circ/\text{сут}$ и вращение жесткое по сравнению со скоростью вращения фотосферных трассеров.

Анализируя солнечные геофизические данные Obridko and Shelting [1989], исследуя корональные дыры 1978–1986 г., пришли к выводу, что СНs вращаются жестко за 2–3 года до солнечного максимума, тогда как в другие годы солнечного цикла корональные дыры вращаются по-разно-

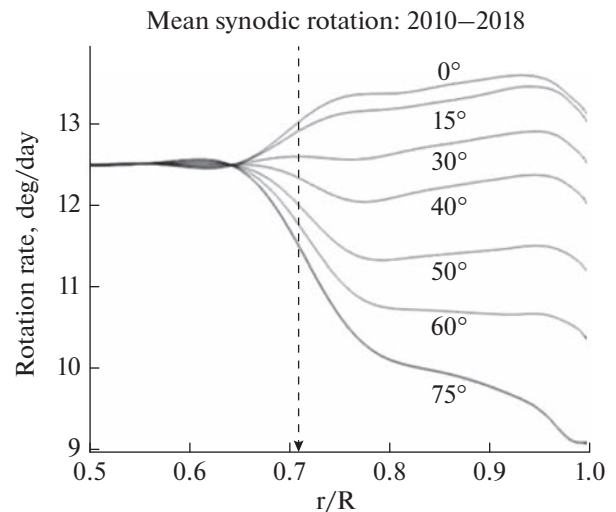


Рис. 1. Внутреннее вращение Солнца. Во внешней части конвективной зоны вращение дифференциальное, в центральной (зона лучистого переноса) — почти однородное. Область перехода между двумя зонами $0.71 R_\odot$ —тахоклин. Рисунок, адаптированный из работы [Larson and Schou, 2018].

му. Navarro-Peralta and Sanchez-Ibarra [1994] показали, что СНs вращаются медленнее во время солнечного максимума и наоборот, быстрее во время солнечного минимума. В одной из последних работ [Hiremath et al., 2022] авторы пришли к выводу: во все годы и для всех широт скорость вращения корональных дыр не зависит от солнечной активности. На экваторе 13.051 ± 0.206 , на высоких широтах 12.993 ± 0.064 , в приполярной области $12.999 \pm 0.329^\circ/\text{сут}$.

В целом, можно считать твердо установленным, что угловая скорость вращения в среднем уменьшается с широтой и глубиной; при этом она получается несколько различной при определении по различным образованиям солнечной активности. Многочисленные исследования показали, что дифференциальное вращение в короне менее выражено, чем на фотосфере.

СНs играют важную роль в формировании структуры межпланетной среды на протяжении всего цикла солнечной активности но, особенно, на ветви спада и во время его минимума. В эти периоды сложность магнитного поля на поверхности Солнца уменьшается, и униполярные СНs становятся доминирующим фактором в определении геомагнитной активности [Cranmer, 2009]. Следует отметить, что в этой фазе нередко наблюдают долгоживущие СНs, появляющиеся, примерно, в одном и том же месте на диске Солнца в течение многих CR подряд и остающиеся стабильными в течение этого времени [Benevolenskaya et al., 2001; Prabhu et al., 2018]. Так как эти СНs живут достаточно долго, есть возможность изу-

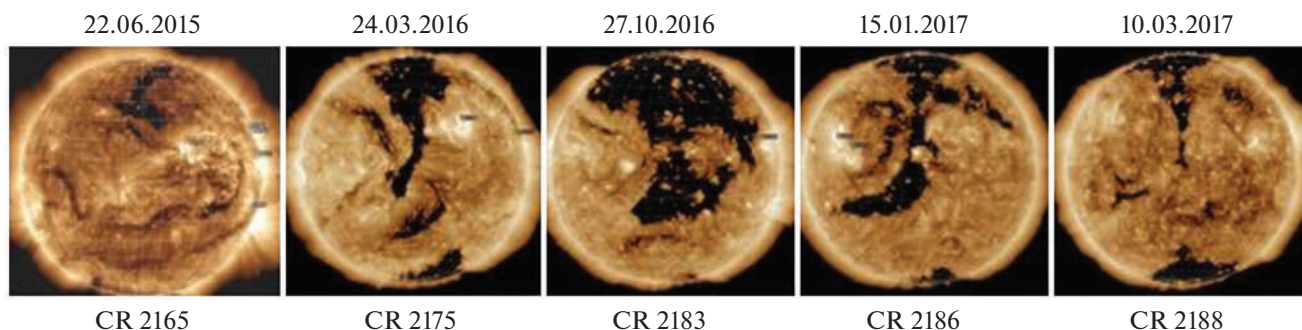


Рис. 2. Фрагменты эволюции долгоживущей коронально дыры 2015–2017 гг.

чить их вращение в разные периоды эволюции. Цель данной работы — исследование вариаций скорости вращения долгоживущей корональной дыры 2015–2017 гг. на протяжении ее эволюции.

2. ДОЛГОЖИВУЩАЯ ГИГАНТСКАЯ КОРОНАЛЬНАЯ ДЫРА 2015–2017 гг.

Настоящая работа продолжает серию работ [Андреева и др., 2018; Andreeva et al., 2018; Ахтемов и др., 2018, Andreeva and Malaschuk, 2019], посвященных исследованию эволюции и влиянию на околоземное пространство долгоживущей гигантской СН (giant coronal hole, GCH) 2015–2017 гг. На рис. 2 представлены изображения солнечного диска с GCH, полученные в линии Fe XII 19.3 нм прибором Atmospheric Imaging Assembly на борту космического аппарата Solar Dynamics Observatory (SDO/AIA) в момент ее прохождения вблизи центрального меридиана, в разные стадии развития. Напомним некоторые моменты ее эволюции.

Признаки исследуемой GCH, с резко очерченной юго-западной границей и размытой, переходящей в промежуточную область северной и западной границами первоначально были обнаружены в июне 2015 г. на широте около 25° . Через два дня, когда GCH оказалась около нулевого меридиана (CR 2165 на рис. 2), впервые были определены ее границы и площадь. В течение последующих оборотов GCH меняла свою площадь, положение и яркость.

Эволюция GCH имела три ярко выраженных этапа. В начальной стадии развития площадь GCH увеличивалась как за счет изменения внешних границ, так и за счет возникновения флоккулярных элементов, пор и активных областей. Этап формирования GCH в короне завершился через 4 кэррингтоновских оборота. При этом площадь корональной дыры в короне существенно увеличивалась, $\sim$ в 4 раза. Затем наступает первая стадия более-менее стабильного существования GCH CR 2168–CR 2172, когда площадь с небольшими флуктуациями $\sim 30\%$ мало меняется.

После CR 2172 на уровне короны в изменении GCH наблюдался резкий спад площади, а после CR 2177 существенное ее увеличение — вторая стадия формирования GCH. Эволюция GCH сопровождалась прохождением через нее 2-х образований повышенной активности [Ахтемов и др., 2018], которые повлияли на изменение многих ее параметров. В течение трех оборотов (CR 2175–2177) уменьшение площади GCH на уровне короны сопровождалось существенной перестройкой GCH и сменой центров активных образований. Вторая стадия сформированной GCH продлилась восемь оборотов (CR 2178–2185). Максимум площади в этой фазе составил на фотосфере $S_{ph} \sim 6 \times 10^{11} \text{ км}^2$, в короне — $S_c \sim 8 \times 10^{11} \text{ км}^2$. В конце существования GCH (после CR 2185) площадь сначала быстро уменьшается в короне, становясь почти равной площади на фотосфере (CR 2188).

В ходе своей эволюции GCH занимала значительную часть северного полушария. В максимуме своего развития GCH распространилась до 30 градусов южного полушария. Она просуществовала более двух десятков оборотов (CR 2165–2188). В это время напряженность магнитного поля значительно (почти в 19 раз) понизилась на большом участке поверхности Солнца, занимаемом GCH.

Ранее нами были получены результаты анализа изменений таких эволюционных характеристик GCH как площадь, интенсивность, напряженность магнитного поля и магнитный поток.

3. ДАННЫЕ И АНАЛИЗ

Работа основана на анализе изображений полного диска Солнца, полученных SDO/AIA в линии Fe XII 193 Å. Время существования GCH 24 CR июнь 2015–март 2017 г. В данной работе мы рассматривали 4 этапа эволюции GCH (CR 2165–2168 — зарождение, две фазы более-менее стабильного существования CR 2172–2179 и 2181–2185 и завершающий этап CR 2186–2188). В исследовании мы решали две задачи:

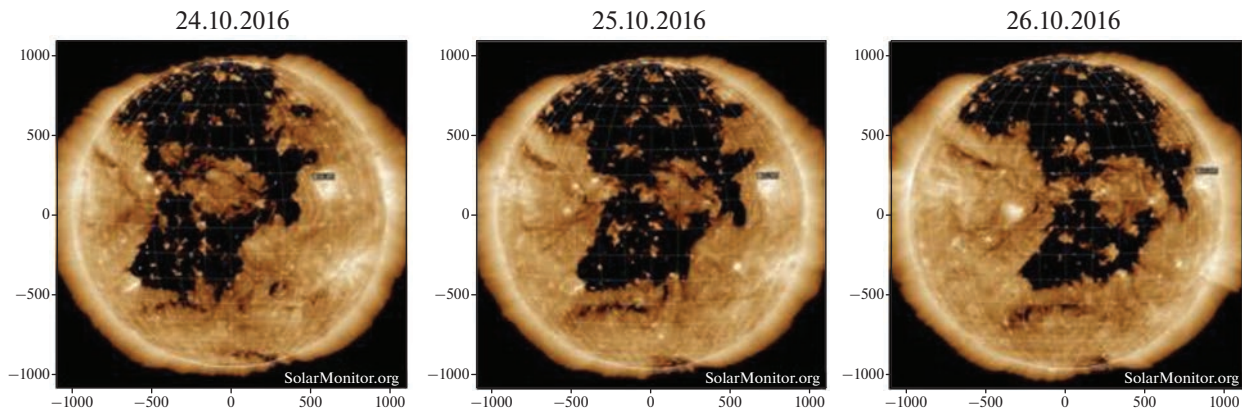


Рис. 3. Долгоживущая корональная дыра на диске Солнца в обороте CR 2183 за три последовательных дня наблюдений: 24, 25 и 26 октября 2016 г. 25 октября центр GCH был ближе всего расположен к центральному меридиану.

— Анализ смещения центра GCH на широте 40° в течение трех последовательных дней для каждого оборота.

— Анализ изменения гелиографической долготы центра GCH (L_{0_CH}) со временем и сравнение с долготой центра диска Солнца (L_0). Анализ выполнен для последовательных изображений, взятых за три дня в обороте для обоих типов данных.

Скорость вращения в каждом CR определялась по смещению границ и центра GCH на широте 40° , в течение 3-х последовательных дней, когда она находилась вблизи центрального меридиана. Изображения GCH в течении трех последовательных дней оборота CR 2183 показано на рис. 3. Во многих оборотах GCH была достаточно протяженной по долготе, и не на всех широтах ее трехдневное смещение можно было наблюдать. В некоторых оборотах ее границы оказывались с одним из лимбов. Широта 40° отвечала тем условиям, что, практически во всех оборотах, можно было определить долготы смещающихся восточных и западных границ GCH.

Несмотря на то, что уже разработано достаточно много алгоритмов отождествления CHs на изображения Солнца, в настоящее время по-прежнему отсутствуют общепринятые как определение границ CHs, так и технологии их идентификации. Главная причина этого заключается в том, что у CHs часто отсутствуют резкие границы. В нашей работе мы воспользовались разработанной нами ранее Solar Data Application (SDA) — специальной программой для проведения границ и определения гелиографических координат GCH на заданных широтах и долготах изображений Солнца в линиях HeI 10830 Å и Fe XII 193 Å. Процесс оконтуривания CHs подробно описан в работе [Andreeva et al., 2018]. Поэтому в этой статье останавливаться на алгоритме выделения GCH мы не будем.

3.1. Анализ смещения центра GCH в заданных интервалах

Для решения первой задачи были определены:

— Гелиографические координаты центра диска (L_0) для рассматриваемых моментов времени

— Гелиографические координаты центра GCH (L_{0_CH}) на широте $\varphi = 40^\circ$. В ходе решения этого пункта задачи нами были найдены:

- l_E и l_W — значения долготы для восточной (E) и западной (W) границ GCH для каждого из трех дней в обороте;

- разность $l_W - l_E$ для тех же дней — размер GCH в градусах на заданной широте для определения центра GCH (l_{C_CH});

- изменение Δl_E , Δl_W и Δl_C за сутки;

- среднее значение Δl_{C_CH} центра GCH для трех дней наблюдений вблизи L_0 в каждом обороте.

Данные обработки материала были использованы для построения графиков динамики размера (рис. 4) и суточных смещений E–W границ и центра GCH (рис. 5a–5б соответственно). На рис. 4 приведен усредненный за 3 дня размер GCH для каждого CR.

Анализируя процесс изменения ширины GCH можно заключить, что он имел несколько ярко выраженных стадий. На широте $\varphi = 40^\circ$ явно просматриваются этапы развития всей GCH. На стадии образования CR 2165–2167 и в конце ее развития CR 2186–2188 ширина GCH минимальна. Наблюдаемое в CR 2175–2176 сужение размера GCH, возможно, связано с перестройкой GCH и прохождением активного центра ниже 40° . Просматриваются также 2 стадии развитой GCH, когда ее ширина была максимальна и более-менее стабильна CR 2168–2174 и CR 2177–2185.

На панелях а, б, в рис. 5 точками обозначены смещения E–W границ и центра GCH между пер-

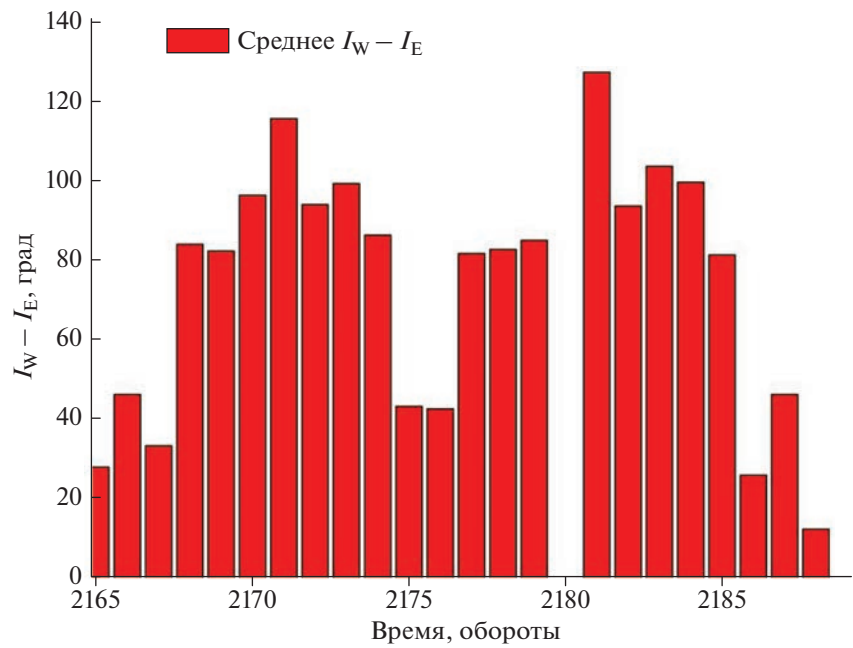


Рис. 4. Изменение поперечного размера долгоживущей корональной дыры на широте $\varphi = 40^\circ$ в процессе эволюции CR 2165–2188.

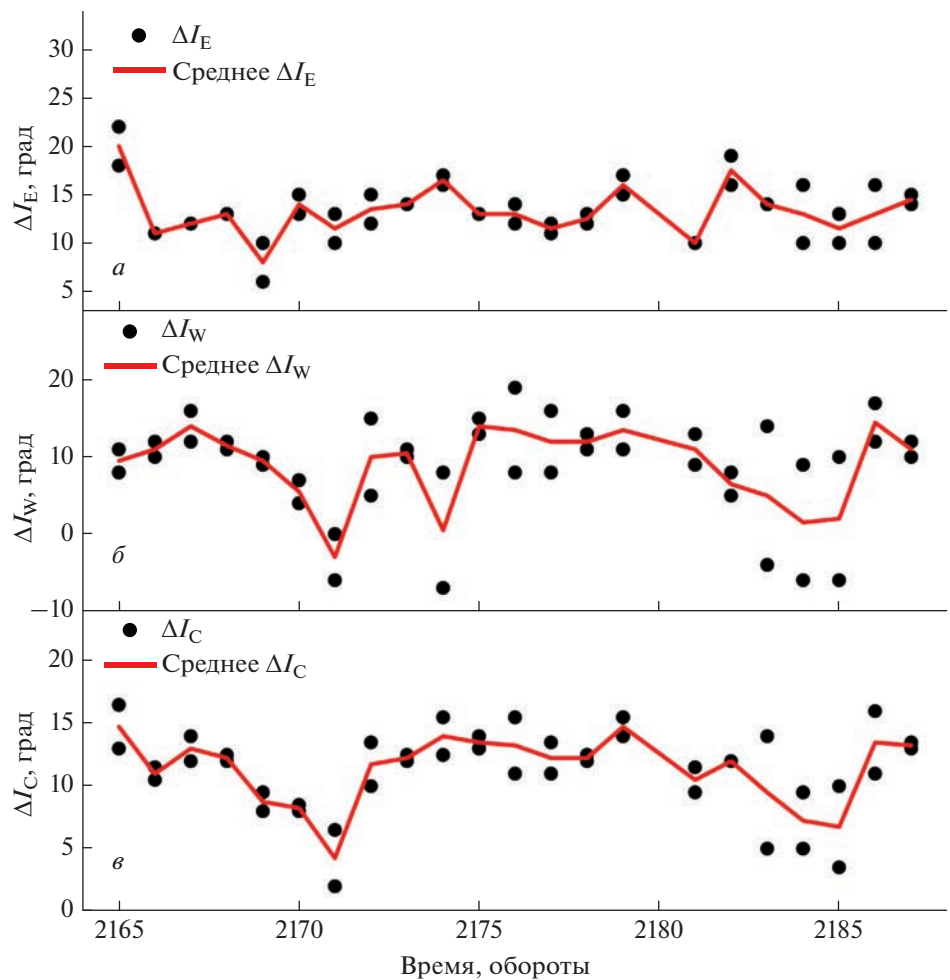


Рис. 5. Суточные смещения границ ΔI_E , ΔI_W и центра ΔI_C долгоживущей корональной дыры на широте $\varphi = 40^\circ$ на протяжении ее эволюции.

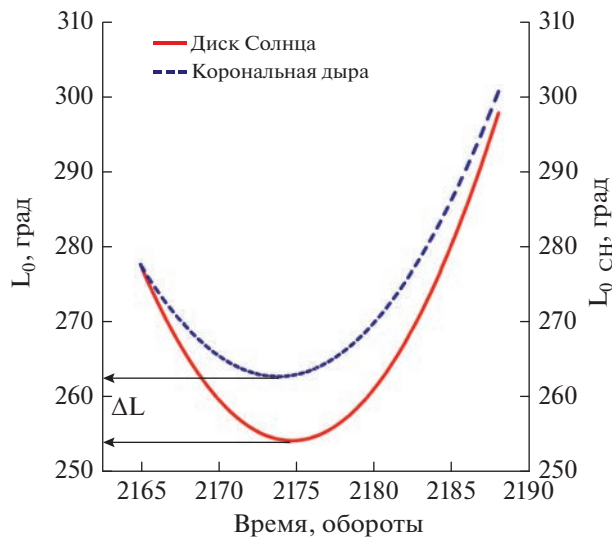


Рис. 6. Изменение гелиографической долготы центра диска Солнца L_0 и центра долгоживущей корональной дыры L_{0_CH} на широте 40° в оборотах CR 2165–2188.

вым—вторым и вторым—третьим днями в каждом обороте. Линиями показаны средние за два дня смещения вышеуказанных величин. Видно, что в какие-то обороты смещения между днями были минимальны, т.е. границы и центр были стабильны. И это особенно характерно для начальной стадии развития GCH для всех 3-х величин. Чего нельзя сказать о развитой GCH и особенно завершающей ее стадии. Следует также отметить, что смещение восточной границы проходило более стабильно, чем западной. Развитие активных центров рядом с GCH и внутри нее оказывали влияние на изменение E–W границ и ее центра.

Мы рассмотрели отдельно четыре стадии развития GCH: CR 2165–2168 — начальную стадию формирования, 2 этапа сформировавшейся корональной дыры CR 2172–2179 и CR 2181–2185 и завершающую фазу CR 2186–2188. Определены средние значения смещения центра GCH для каждого из четырех этапов ее развития:

- I этап: обороты 2165–2168 ΔL_{C_CH} 10.5–14.75°/сут, среднее — 12.75°/сут;
- II этап: обороты 2172–2179 ΔL_{C_CH} 11.7–14.7°/сут, среднее — 13°/сут;
- III этап: обороты 2181–2185 ΔL_{C_CH} 10.5–13°/сут, среднее — 11.7°/сут;
- IV этап: обороты 2186–2188 ΔL_{C_CH} 10–13.5°/сут, среднее — 12.5°/сут;

Полученные нами значения скорости вращения GCH на широте 40° согласуются с результатами других авторов. Бадалян и др. [2006] нашли, что стандартная скорость вращения диска Солнца в короне на широте 40° равна $\sim 12.6^\circ$ /сут. В одной из

последних работ [Hiremath et al., 2022] авторы пришли к выводу: на высоких широтах скорость вращения корональных дыр составляет $\sim 12.993^\circ$ /сут. На первом и последнем этапах развития корональной дыры скорость вращения близка к стандартной, на втором — немного больше. На третьем этапе скорость снизилась. Мы объясняем это тем, что в это время сформировавшаяся GCH достигла значительных размеров и мало менялась, особенно на этой широте. В конечной фазе развития CR 2186–2188 с GCH происходили значительные изменения, она быстро сужалась.

3.2. Изменение гелиографической долготы центра GCH со временем и сравнение с долготой диска Солнца

Мы представили средние значения гелиографической долготы центрального меридиана диска Солнца (L_0) и средние значения долготы центра GCH (L_{0_CH}) за 3 сут для каждого из оборотов в виде полиномов 2-ой степени.

Нами получено: в максимальной стадии развития GCH $L_{0_CH} = 262.5^\circ$, $L_0 = 254^\circ$, при этом $\Delta L = 8.5^\circ$ (рис. 6). Это говорит о том, что центр корональной дыры оказался раньше на нулевом меридиане, чем центр Солнца, т.е. скорость вращения GCH, в максимальной фазе ее развития, больше скорости вращения диска Солнца.

4. ВЫВОДЫ

Ранее нами были получены результаты анализа изменений таких эволюционных характеристик долгоживущей корональной дыры 2015–2017 гг. как площадь, интенсивность, напряженность магнитного поля и магнитный поток. Эта работа добавляет еще одну характеристику — вращение GCH. В результате статистического исследования характеристик вращения установлено:

— Средняя скорость вращения GCH на широте 40° близка к стандартной скорости в начальной стадии (12.75° /сут) и в первой фазе максимального развития (13° /сут); меньше — во второй фазе максимального развития (11.7° /сут). Увеличение скорости на завершающем этапе (12.5° /сут) связано с перестройкой корональной дыры.

Согласно современным теориям, вращение солнечной короны отражает вращение подфотосферных слоев. Более высокие слои короны отражают вращение более глубоких слоев Солнца. Результаты, полученные в нашей работе, показывают, что скорость вращения GCH, в максимальной фазе ее развития, больше скорости вращения диска Солнца ($\Delta L = 8.5^\circ$). Возможно, это свидетельствует о том, что CHs могут быть связаны с глубокими солнечными слоями через конфигурацию глобального магнитного поля и что источ-

ник образования СНs находится более глубоко, чем источник фонового поля.

БЛАГОДАРНОСТИ

SDO является проектом программы NASA Living With a Star. Мы благодарны команде центра Joint Science Operation Centre (JSOC) за возможность использовать данные SDO/AIA в нашем исследовании.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (НИР № 1021051101548-7-1.3.8).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов с другими исследователями в данной области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреева О.А., Малащук В.М., Ахтемов З.С., Жигалкин Р.К. Изменение площади и интенсивности гигантской корональной дыры // Изв. Крымск. Астрофиз. обс. Т. 114. № 1. С. 129–134. 2018.
- Ахтемов З.С., Перебейнос В.А., Штерцер Н.И. Гигантская корональная дыра 2015–2017 гг.: II магнитное поле и связь с активными образованиями // Изв. Крымской Астрофиз. обс. Т. 114. № 1. С. 123–128. 2018.
- Бадалян О.Г., Обридко В.Н., Сикора Ю. Циклические вариации дифференциального вращения солнечной короны // Астрономический журн. Т. 83. № 4. С. 352–367. 2006.
- Andreeva O.A., Akhtemov Z.S., Malashchuk V.M., Zhigalkin R.K. Study of Variations of Some Characteristics of the Giant Coronal Hole of 2015–2017 // Geomagnetism and Aeronomy. V. 58. № 8. P. 916–924. 2018.
- Andreeva O.A., Malashchuk V.M. The changing in the vertical boundaries of a giant coronal hole // AApTr, V. 31. № 2. P. 209–216. 2019.
- Bagashvili S.R., Shergelashvili B.M., Japaridze D.R. et al. Statistical properties of coronal hole rotation rates: Are they linked to the solar interior? // Astron Astrophys V. 603:A134. 2017.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201630377>
- Benevolenskaya E.E., Kosovichev A.G., Scherrer P.H. Detection of high-latitude waves of solar coronal activity in extreme-ultraviolet data from the solar and heliospheric observatory EUV imaging telescope // Astrophys. J. V. 554. P. 107–110. 2001.
- Cranmer S.R. // Living Rev. in Sol. Phys. V. 6. 3. 2009.
<https://doi.org/10.12942/lrsp-2009-3>
- Glencross W.M. Formation of holes in the solar corona // Nature V. 250. P. 717–719. 1974.
- Hiremath K.M., Hegde M. Rotation rates of coronal holes and their probable anchroneic depths // ApJ. V. 763. № 2. P. 137–148. 2013.
- Hiremath K.M., Hegde M., Varsha K.R. Rotation rate of high latitude and near polar coronal holes. 2022.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2204.04193>
- Insley J.E., Moore V., Harrison R.A. The differential rotation of the corona as indicated by coronal holes // Sol. Phys. V. 160. P. 1–18. 1995.
- Japaridze D.R., Bagashvili S.R., Shergelasvili B.M., Chargeishvili B.B. Investigation of Solar Rotation Using Coronal Holes // Astrophysics. V. 58. P. 575–579. 2015.
- 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 // Sol. Phys., V. 29. P. 505–525. 1973.
- Larson T.P., Schou J. Global-Mode Analysis of Full-Disk Data from the Michelson Doppler Imager and the Helioseismic and Magnetic Imager // Solar Phys. V. 293. P. 2–29. 2018.
<https://doi.org/10.1007/s11207-017-1201-5>
- Mancuso S., Giordano S. Differential rotation of the ultraviolet corona at solar maximum // Astrophys. J. V. 729. P. 79–86. 2011.
- Navarro-Peralta P., Sanchez-Ibarra A. An observational study of coronal hole rotation over the sunspot cycle // Solar Phys. V. 153. P. 169–178. 1994.
- Obridko V.N., Shelting B.D. Coronal holes as indicators of large-scale magnetic fields in the corona // Sol. Phys. V. 124. 73–80. 1989.
- Oghrapishvili N. B., Bagashvili S.R., Maghradze D.A. et al. Study of the solar coronal hole rotation. // Advances in Space Research. V. 61. № 12. P. 3039–3050. 2018.
- Prabhu K., Ravindra B., Manjunath Hegde, Vijayakumar H. Doddamani. Recurring coronal holes and their rotation rates during the solar cycles 22–24 // Astrophys. Space Sci. V. 363. P. 108–118. 2018.
- Shelke R.N., Pande M.C. Differential rotation of coronal holes // Solar Phys. V. 95. P. 193–197. 1985.
- Stepanian N.N., Andryeyeva O.A., Zyelyk Ya.I. Rotation of Solar Structures in the Upper Chromosphere. II. Time Variations in the Latitudinal Distribution of the Rotation of Active Regions and Coronal Holes // Bull. of the Crimean Astrophys. Obs. V. 103. № 1. P. 48–62. 2007.
- Timothy A.F., Krieger A.S., Vaiana G.S. The structure and evolution of coronal holes // Sol. Phys. V. 42. P. 135–156. 1975.
- Tousey R., Bartoe J.D.F., Bohlin J.D. et al. A preliminary study of the Extreme Ultraviolet spectroheliograms from Skylab // Sol. Phys. 33. P. 265–280. 1973. 1985.
- Wagner W.J. Solar rotation as marked by extreme-ultraviolet coronal holes // Astrophys. J. Lett. V. 198. L141. 1975.
<https://doi.org/10.1007/s10509-018-3307-0>
- Wagner W.J. Rotational characteristics of coronal holes: In: Bumba, V., Kleczek, J. (eds.) // Basic Mechanisms of Solar Activity. IAU Symposium. V. 71. P. 41–45. 1976.