РАЗВИТИЕ АКТИВНОСТИ И ЭВОЛЮЦИЯ ПОЛЯРНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ СОЛНЦА В ЦИКЛАХ 21–24

Мордвинов А.В.¹, Кичатинов Л.Л.^{1,2}, Голубева Е.М.¹

¹*Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН, Иркутск, Россия*

²*Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия*

DEVELOPMENT OF SOLAR ACTIVITY AND EVOLUTION OF THE SUN'S POLAR FIELDS IN CYCLES 21-24

Mordvinov A.V.¹, Kitchatinov L.L.^{1,2}, Golubeva E.M.¹

¹*Institute of Solar-Terrestrial Physics of Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russia*

²*Central Astronomical Observatory at Pulkovo, St. Petersburg, Russia*

The evolution of the Sun's magnetic fields was studied in cycles 21–24. The global restructuring of the open magnetic flux and the formation of polar coronal holes were also studied using synoptic maps of the magnetic field and coronal holes. The time-latitude analysis is adequate to understand the features of individual cycles and their general patterns. The analysis makes it possible to study the poleward flux transport and asynchronous formation of polar coronal holes.

DOI: 10.31725/0552-5829-2020-225-230

Введение

Эмпирическая концепция Бэбкока-Лейтона [1], современные теории динамо переноса магнитного потока [2, 3], модели переноса остаточного магнитного потока [4] в целом воспроизводят основные особенности формирования и обращения полярного поля Солнца [5, 6]. Глобальная реорганизация магнитных полей и смена доминирующих полярностей на полюсах Солнца завершается формированием полярных корональных дыр (ПКД). Установлено, что на этой фазе цикла корональные дыры появляются на более высоких широтах [7]. Определяющую роль в циклической реорганизации открытого магнитного потока играют ансамбли корональных дыр (АКД), которые формируются в униполярных магнитных областях (УМО) вблизи распадающихся комплексов активности (КА) [8].

Эволюция АКД определяется процессами пересоединения открытых и закрытых магнитных полей. Постепенное накопление и объединение АКД в полярных областях Солнца приводит к формированию ПКД. В целом эти наблюдательные факты укладываются в современные теоретические представления и учитываются в модельных расчетах. Вместе с тем, формирование ПКД и общие закономерности эволюции остаются плохо изученными.

В настоящей работе выполнен анализ развития активности в циклах 21–24. Изучена эволюция крупномасштабных магнитных полей, обращение магнитных полей и формирование корональных дыр на полюсах

Солнца. Показано, что обращение магнитных полей на полюсах Солнца во многом определяется развитием низкоширотной активности.

Данные и метод

Для решения поставленной задачи выполнен совместный анализ синоптических карт магнитных полей и корональных дыр (КД). Использованы синоптические карты радиальной компоненты магнитного поля и КД, построенные по многолетним измерениям обсерваторий Китт Пик, Солис, и космических обсерваторий SoHO/EIT и SDO/AIA.

В работе использованы магнитные синоптические карты NSO/GONG 6768 Å и фильтрограммы SDO/AIA 193 Å. По фильтрограммам получены синоптические карты распределения КД с применением методики [8]. Оба ряда карт были усреднены по 5-ти кэррингтоновским оборотам так, что карта центрального оборота оставалась без изменений, а для двух предыдущих и двух последующих карт учитывалось дифференциальное вращение. Далее усредненные распределения МП были очищены от погрешностей и шумов с помощью вейвлет-фильтрации.

Широтно-временной анализ магнитных полей Солнца и обращение его магнитных полей на полюсах в циклах 21–24

На рис. 1а,в показаны изменения площадей солнечных пятен в северном и южном полушариях Солнца, соответственно. Распределение площадей солнечных пятен по гелиошироте оценено по данным, подготовленным в синоптическом формате (<http://solarcyclescience.com>). Площади солнечных пятен характеризуют всплывающие магнитные потоки, которые появляются асинхронно в северном и южном полушариях Солнца. Области интенсивного пятнообразования показаны в широтно-временном распределении магнитных полей (черные пятна, рис. 1б).

По мере эволюции комплексов активности (КА) и после их распада слабые магнитные поля рассеиваются в окружающей фотосфере, образуя униполярные магнитные области (УМО). Диффузия и адвекция остаточного магнитного потока определяют дальнейшую эволюцию УМО [3]. УМО преимущественно хвостовых полярностей переносятся к полюсам Солнца меридиональными течениями [9].

Для изучения эволюции фотосферных магнитных полей выполнен широтно-временной анализ последовательности синоптических карт за период 1975–2020 гг. Каждая карта усреднялась по гелиодолготе, чтобы определить широтный профиль, характеризующий зональную структуру магнитного поля. Широтные профили всех карт были выстроены в хронологическом порядке в виде широтно-временного распределения, которое сглажено с помощью вейвлет-фильтрации. Сглаженное распределение показано на рис. 1б. Области, в которых доминирует положительная либо от-

рицательная полярность, показаны в бело-серых и черно-серых тонах соответственно.

Рис. 1. Изменения площадей пятен в северном (а) и южном (в) полушариях Солнца. Широтно-временное распределение доминирующих магнитных полей положительных в светло-серых и отрицательных в темно-серых тонах. (б). Зоны интенсивного пятнообразования показаны черными пятнами. Критические сердцы хвостовых полярностей указаны сплошными стрелками. В цикле 21 сердц ведущей полярности указан штриховой стрелкой.

Широтно-временное распределение наглядно показывает циклические изменения зональной структуры магнитных полей, их глобальную реорганизацию в циклах 21–24 [10, 11]. Обращение магнитных полей на полюсах Солнца происходит в эпохи максимумов активности. Смены доминирующих полярностей отмечены стрелками на рис. 1б. Эти стрелки отмечают положение критических сердцев, которые образуются после распада долгоживущих КА и формирования УМО.

В соответствии с законом Джоя, УМО хвостовых полярностей формировались на более высоких широтах по сравнению с УМО ведущих полярностей. Меридиональный перенос и дифференциальное вращение определяют форму УМО на высоких широтах. УМО преимущественно хвостовых полярностей показаны изогнутыми стрелками, форма которых примерно соответствует широтной зависимости скорости меридиональных течений

[9]. Основания сердечей, как правило, формируются после распада долгоживущих комплексов активности в областях интенсивного пятнообразования. В северном и южном полушариях критические серджи отмечены обозначениями N1, N2, N3, N4 и S1 S2 S3 S4 (рис. 16).

В северном полушарии 21-го цикла активности произошла трехкратная смена доминирующих полярностей. Детальный анализ показал, что сложный характер обращения полярных магнитных полей связан с формированием сердечей хвостовых и ведущих полярностей, их чередованием в период переполюсовки.

Эффекты крупномасштабного магнитного поля наблюдаются также в хромосфере Солнца в спектральной линии H α . Хромосферные волокна и каналы волокон прослеживаются вдоль линий раздела полярностей. В.И. Макаров и К.Р. Сивараман выполнили анализ крупномасштабных магнитных полей Солнца по данным обсерватории Кодайканал [12]. Они изучили миграцию хромосферных волокон и обнаружили трехкратные обращения полярных магнитных полей в циклах 19 и 20 в северном полушарии. Долгое время природа многократных была неизвестна. Следует также отметить, что анализ миграции хромосферных волокон к полюсам не выявил многократных обращений полярного поля в цикле 21 [12].

Реструктуризация магнитных полей Солнца и формирование полярных корональных дыр

В цикле 23 наблюдались мощные центры активности. После их распада сформировались критические серджи, которые достигли полярных областей Солнца. С поступлением магнитного потока нового цикла сформировались устойчивые полярные корональные дыры (ПКД). Магнитная активность Солнца в цикле 24 характеризовалась значительной северо-южной асимметрией. В начале цикла магнитный поток преобладал в северном полушарии, достигнув своего максимума в 2011 г. При распаде активных областей в северном полушарии (N4) сформировались первые серджи. В южном полушарии наблюдались мощные центры активности (S3, S4), и максимальный уровень активности в 2014–2015 гг. был значительно выше, чем в северном. После распада центра активности S3 возник обширный ансамбль корональных дыр, из которого позже сформировалась ПКД на южном полюсе [8].

Северо-южная асимметрия пятнообразовательной активности Солнца привела к значительной асинхронности обращения магнитного поля на его полюсах. На северном полюсе Солнца смена отрицательной полярности на положительную произошла в начале 2013 г. Позднее развитие активности в южном полушарии привело к задержке смены доминирующей полярности на южном полюсе примерно на 2 года.

После распада долгоживущих КА происходят процессы, охватывающие все слои атмосферы Солнца. В фотосфере формируются УМО, кото-

рые переносятся меридиональными течениями в полярные области. В короне формируются ансамбли корональных дыр, играющие важную роль в глобальной реорганизации открытого магнитного потока [8]. По мере переноса УМО к полюсам, внутри них формируются высокоширотные корональные дыры, которые затем превращаются в полярные корональные дыры. На рис. 2 показано широтно-временное распределение областей интенсивного пятнообразования в циклах 23 и 24. Распад КА приводит к образованию УМО и формированию критических сердечей, отмеченных стрелками (1–4).

Рис. 2. Широтно-временное распределение магнитных полей в циклах 23 и 24. Критические сердечки отмечены стрелками. Области частого появления корональных дыр показаны белыми контурами.

Выводы

Эволюция полярных магнитных полей Солнца изучена в соотношении с развитием низкоширотной активности в циклах в 21–24. Исследованы особенности формирования УМО после распада активных областей. Показано, что меридиональный перенос УМО приводит к образованию сердечей, формирующих магнитный поток в полярных областях Солнца. Сердечки хвостовых полярностей дают основной вклад в формирование магнитного потока в полярных областях Солнца. Анализ эволюции крупномасштабных магнитных полей выявил трехкратное обращение магнитных полей на полюсах Солнца в цикле 21. Сложный характер обращения полярных магнитных полей связан с формированием сердечей хвостовых и ве-

дущих полярностей, их чередованием в период переполюсовки. Результаты исследования показали причину многократных обращений магнитных полей на полюсах Солнца.

Циклические изменения крупномасштабных магнитных полей Солнца сопровождаются глобальной реорганизацией ансамбля корональных дыр. По мере переноса УМО к полюсам, над ними формируются высокоширотные АКД, которые превращаются в ПКД. Причинно-следственные соотношения между комплексами активности, униполярными магнитными областями и ансамблями корональных дыр позволили объяснить особенности формирования ПКД в текущем цикле. Распад долгоживущих КА, наблюдавшихся в 2014 г., привел к образованию обширного АКД, который вскоре превратился в южную ПКД. Чередование УМО противоположных полярностей привело к сложной структуре магнитных полей в полярной зоне северного полушария, что задержало формирование северной ПКД.

Работа выполнена в рамках Государственного задания П.16 и поддержана грантом РФФИ 19-52-45002-инд.

Литература

1. *Babcock H.W.* // *Astrophys. J.* 1961. 133. 572.
2. *Choudhuri A.R., Schussler M., Dikpati M.* // *Astron. Astrophys.* 1995. 303. L29.
3. *Wang Y.-M., Sheeley N.R. Jr.* // *Astrophys. J.* 1991. 375, 761.
4. *Petrie G.J.D.* // *Living Reviews in Solar Phys.* 2015. 12. 5.
5. *Jiang J., Hathaway D.H., Cameron R.H., et al.* // *Space Sci. Rev.* 2014. 186. 491.
6. *Harvey K.L., Recely F.* // *Solar Phys.* 2002. 211. 31.
7. *Golubeva E.M., Mordvinov A.V.* // *Solar Phys.* 2017. 292. 175.
8. *Hathaway D.H., Rightmire L.* // *Astrophys. J.* 2011. 729. 80.
9. *Sun X., Hoeksema J.T., Liu Y., Zhao J.* // *Astrophys. J.* 2015. 798. 114.
10. *Mordvinov A.V., Kitchatinov L.L.* // *Solar Phys.* 2019. 294. 21.
11. *Makarov V.I., Fatianov M.P., Sivaraman K.R.* // *Solar Phys.* 1983. 85. 215.
12. *Кичатинов Л.Л., Олемской С.В.* // *Письма в АЖ.* 2011. 37. 9. 713.