

О СВЯЗИ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР И КОМПЛЕКСОВ АКТИВНОСТИ НА СОЛНЦЕ

¹**Е.С. Исаева**, ²**В.М. Томозов**, ^{1,2}**С.А. Язев**

¹Астрономическая обсерватория ИГУ, Иркутск, Россия
ele3471@yandex.ru

²Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

ON RELATIONSHIP BETWEEN CORONAL HOLES AND COMPLEXES OF ACTIVITY ON THE SUN

¹**E.S. Isaeva**, ²**V.M. Tomozov**, ^{1,2}**S.A. Yazev**

¹ISU Astronomic Observatory, Irkutsk, Russia
ele3471@yandex.ru

²Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

Аннотация. По данным 24-го цикла солнечной активности выполнено исследование статистической связи комплексов активности и корональных дыр на Солнце.

Abstract. Using data of the 24th solar cycle, we studied the statistical relationship between complexes of activity and coronal holes on the Sun.

ВВЕДЕНИЕ

Комплексы активности (КА) и корональные дыры (КД) на Солнце являются важными проявлениями солнечной активности, отличающимися своей геоэффективностью: КА являются преимущественными местами локализации сильных вспышек и выбросов коронального вещества, КД порождают потоки высокоскоростного солнечного ветра, генерирующего геомагнитные бури. Поскольку разные авторы по-разному используют понятие КА, уточним определение.

Комплексы активности (далее КА). Понятие КА менялось со временем — от описания крупномасштабных магнитных структур [Vumba, Howard, 1965] (эти авторы и предложили термин КА) до сложных систем многочисленных активных областей (АО), расположенных вдоль солнечной параллели и опоясывающих все Солнце [Gaizauskas et al., 1983]. В работах [Обридко, Шельтинг, 2013; Наговицын, Обридко, 2017] было предложено новое понятие глобального КА, описывающее структуры, связанные с мощными пятнами и простирающиеся от глубинных слоев конвективной зоны [Kosovichev, Duvall, 2006; Plonidis et al., 2011] до короны. В целом в современной литературе доминирует представление о КА как о крупной вспышечной АО либо о системе нескольких АО.

Авторы используют следующий подход, предложенный в работах [Банин, Язев, 1989, 1997]. В качестве ключевого параметра КА была выбрана длительность существования АО не менее двух оборотов подряд на одном и том же участке солнечной поверхности, выделенном в кэррингтоновской системе координат. Это значит, что пятна должны наблюдаться как минимум трижды в течение трех последовательных оборотов. Поскольку продолжительность существования одной группы пятен в подавляющем большинстве случаев оказывается кратко меньше [Брей и Лоухед, 1967; Витинский и др., 1986], присутствие пятен на одном и том же месте в течение нескольких оборотов подряд означает, что здесь одна за другой всплывают из-под фотосферы

новые порции магнитного потока в форме новых АО. Такие участки длительного пятнообразования с эмпирически определенным размером $20^\circ \times 20^\circ$ первоначально получили название площадок длительной активности (ПДА) [Банин, Язев, 1989], позднее для них был предложен другой термин — ядра КА [Язев и др., 2011; Язев, 2015]. В рамках этого подхода используется также понятие «ветвь КА» — АО, в данном кэррингтоновском обороте находящаяся поблизости (не более 30°) от ядра КА и связанная с АО, расположенной в ядре КА, высокими корональными петлями. Ветвь (отдельная АО) существует сравнительно недолго по сравнению с ядром КА, где АО могут сменять одна другую. В отличие от ядра КА ветвь КА подчиняется дифференциальному вращению, постепенно смещаясь по долготе в кэррингтоновской системе координат. АО, одновременно находящиеся в ядре КА и в ветви КА, образуют в данном обороте комплекс активных областей (КАО). Таким образом, КАО в рамках излагаемого подхода — это единовременный «срез» КА, описание состояния КА в данный момент времени без учета длительной эволюции КА. В следующем обороте данной ветви уже не будет, но ядро КА может продолжать существовать в форме новой АО, появившейся на том же месте. При этом общая магнитная структура КА может сохраняться, медленно эволюционируя на протяжении нескольких оборотов [Язев, 2015].

Корональные дыры (далее КД). КД стали важной темой гелиофизических исследований, прежде всего, в связи с выдающимися достижениями, полученными в ходе выполнения научной миссии орбитальной станции Skylab в 1973–1975 гг. В этот период на фазе спада 20-го цикла солнечной активности в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах впервые наблюдались впечатляющие огромные трансэкваториальные КД (типа хобота слона), существовавшие не протяжении нескольких оборотов Солнца. Большое количество работ, выполненных разными авторами, сформировали общепринятую феноменологическую модель КД [Timothy et al., 1975; Zirker, 1977; Levine, 1977; Филиппов, 2007; Наговицын, Обридко,

2017] как область с преимущественно открытой конфигурацией магнитных полей в короне, для которой характерна пониженная плотность плазмы. Это приводит к уменьшению меры эмиссии в корональных спектральных линиях — при соответствующих наблюдениях КД выглядит как обширная (как правило) область пониженной яркости.

КД являются источниками высокоскоростных потоков быстрого солнечного ветра, которые могут оказывать активное воздействие на магнитосферу Земли, приводя к геомагнитным бурям. В открытом магнитном поле КД обычно преобладает одна полярность, что вызвано непрерывным дисбалансом выхода нового магнитного потока [Степанян, 1993; Степанян, Маланушенко, 2001, Heinemann et al., 2018].

В работе [Банин, Язев, 1991] была показана качественная связь между КА и КД. Был сформулирован тезис о их генетической связи: КД рассматривались как результат эволюции магнитных полей КА после завершения стадий развития и распада пятен.

В работе [Язев, 2010], дополняющей и развивающей этот подход, на материале наблюдений в 22-м цикле были более подробно показаны типы феноменологических проявлений взаимодействия одновременно сосуществующих КА и КД, предварительно отмеченные в [Банин, Язев, 1991]. В частности, были описаны

- эффект притяжения, когда длинные (протяженностью 30° – 60°) выступы (хоботы) полярных корональных дыр (ПКД) целенаправленно протягиваются в сторону низких широт к АО, расположенной в ядре КА;
- эффект заливов, когда участок КД полукольцом (дугой) охватывает АО в ядре КА;
- эффект замещения, когда КД возникает на месте исчезнувшей АО в ядре КА.

В настоящей работе выполнено исследование феноменологической и статистической связи КА и КД в 24-м цикле солнечной активности.

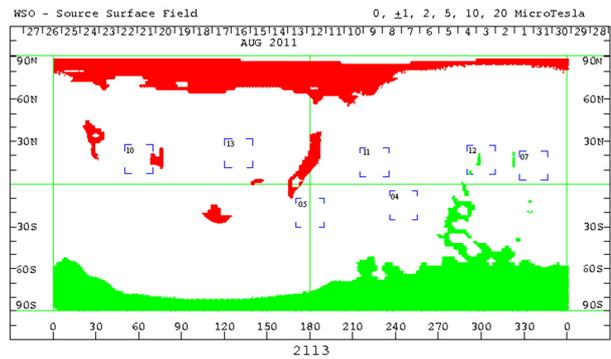
ДАнные И МЕТОДИКА

Использованы данные о развитии КА и КД в 24-м цикле. Динамика КД исследовалась по набору синоптических карт GONG. КА идентифицировались в соответствии с методикой, описанной в [Язев, 2015]. Был составлен каталог КА в 24-м цикле. На синоптические карты (рисунок) с контурами КД были нанесены ядра КА в виде квадратов размерами $20^{\circ} \times 20^{\circ}$ согласно данным указанного каталога. В случае необходимости более детального анализа использовались оригинальные изображения Солнца, полученные обсерваторией SDO [<https://sdo.gsfc.nasa.gov/data>].

Выводы

Анализ взаимного расположения КА и КД в 24-м цикле приводит к следующим заключениям:

1. Первые низкоширотные КД в цикле возникают в виде выступов (хоботов) полярных КД, протягивающихся в сторону АО в составе КА.
2. Изолированные (не связанные с полярными КД) низкоширотные КД возникают как результат эво-



Синоптическая карта: выделены ядра КА (квадраты) и КД (цветные фигуры) различной магнитной полярности

люции хоботов полярных КД. Низкоширотные КД, как и хоботы, взаимодействуют с АО КА, что определяет их конфигурацию.

3. Эффект замещения, когда на месте распавшихся АО КА возникает КД, проявляется не в появлении новой КД вместо АО, а в распространении (расширении или удлинении) уже существующей близлежащей КД на место распавшейся АО. КД рождаются от КД, а не от КА, но КА оказывают влияние на их локализацию и форму.

4. Высокоширотные КД (как правило, хоботы полярных КД) подчиняются дифференциальному вращению, околополярное основание хобота смещается к востоку с характерной скоростью около 10° за оборот. Низкоширотные изолированные КД, взаимодействующие с КА, вращаются с кэррингтоновской скоростью. Низкоширотные КД, не связанные с КА, подчиняются дифференциальному вращению.

5. Возникновение хоботов полярных КД связано с влиянием АО (прежде всего, АО в составе КА). Механизм формирования хоботов требует дальнейших исследований.

6. Подтвержден сделанный ранее вывод о том, что все КА на определенном этапе своего развития связаны с близлежащими КД. Это проявляется в изменениях формы границ КД и в особенностях скорости вращения КД.

Работа выполнена на УНУ «Астрофизический комплекс МГУ-ИГУ», поддержана Минобрнауки России (соглашение 13.УНУ.21.0007, гос. задание FZZE-2020-0017, FZZE-2020-0024), а также субсидией Минобрнауки России №075-ГЗ/Ц3569/278.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Банин В.Г., Язев С.А. Площадки длительной активности на нисходящей ветви солнечного цикла № 21. *Кинематика и физика небесных тел*. 1989. Т. 5, № 4. С. 62–68.
- Банин В.Г., Язев С.А. Комплексы активности и корональные дыры. *Солнечные данные*. 1991. № 1. С. 78–83.
- Банин В.Г., Язев С.А. ПДА в циклах солнечной активности. *Современные проблемы солнечной цикличности: труды конференции, посвященной памяти М.Н. Гневышева и А.И. Оля*. СПб., 1997. С. 9–13.
- Брей Р., Лоухед Р. *Солнечные пятна*. М.: Мир, 1967. 383 с.
- Витинский Ю.И., Копецкий М., Куклин Г.В. *Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца*. М.: Наука, 1986. 296 с.
- Наговицын Ю.А. Обридко В.Н. *Солнечная активность, цикличность и методы прогноза*. СПб, Изд-во ВВМ, 2017. 466 с.

- Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д. Глобальные комплексы солнечной активности. *Астрономический журнал*. 2013. Т. 90, № 10. С. 857–868.
- Степанян Н.Н. *Корональные дыры и фоновые магнитные поля. Солнечный цикл*. Санкт-Петербург. ФТИ, 1993. С. 36.
- Степанян Н.Н., Маланушенко Е.В. Связь корональных дыр с окружающими магнитными полями. *Изв. КРАО*. 2001. Т. 97. С. 76–80.
- Филиппов Б.П. *Эруптивные процессы на Солнце*. М.: Физматлит, 2007. 216 с.
- Язев С.А. Комплексы активности в 24-м цикле солнечной активности. *Астрономический журнал*. 2015. Т. 92, № 3. С. 260–269.
- Язев С.А. Корональные дыры и комплексы активности на Солнце. *Изв. ИГУ. Сер. Науки о Земле*. 2010. Т. 3, № 2. С. 226–241.
- Язев С.А., Коротких А.В., Тарлюк И.Г. Комплексы активности в циклах Швабе—Вольфа. *Солнечно-земная физика*. 2011. Вып. 19 (132). С. 3–8.
- Bumba V., Howard R. Large-scale distribution of solar magnetic fields. *Astrophys. J.* 1965. Vol. 141, no. 4. P. 1502–1512.
- Gaizauskas V., Harvey K.L., Harvey J.W., Zwaan C. Large-scale patterns formed by active solar regions during the ascending phase of cycle 21. *Astrophys. J.* 1983. Vol. 265. P. 1056–1065.
- Ilonidis S., Zhao J., Kosovichev A. Detection of emerging sunspot regions in solar interior. *Science*. 2011. Vol. 333. P. 993–996.
- Heinemann S.G., Hofmeister S.J., Veronig A.M., Temmer M. Three-phase evolution of a coronal hole. II. The magnetic field. *Astrophys. J.* 2018. Vol. 863, no. 29. 10 p.
- Kosovichev A.G., Duvall JR T.L. Active region dynamics. Recent helioseismology results dynamics. *Solar Dynamics and its Effects on the Heliosphere and Earth*. Dordrecht, Netherlands-Springer, 2006. P. 1–12.
- Levine R.H. Evolution of open magnetic structures on the Sun. The Skylab period. *Astrophys. J.* 1977. Vol. 218. Part 1. P. 291.
- Timothy A.F., Krieger A.S., Vaiana G.S. The structure and evolution of coronal holes. *Solar Phys.* 1975. Vol. 42, no. 1. P. 135–156.
- Zirker J. *Coronal Holes and High-Speed Wind Streams*. Colorado Associated University Press. Boulder, Colo, 1977. URL: <https://sdo.gsfc.nasa.gov/data>.