Секция А. Астрофизика и физика Солнца. БШФФ-2026. С. 56–58.

УДК 523.98
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-56
Orcid: 0000-0002-1776-0829

ОСОБЕННОСТИ ЭВОЛЮЦИИ ВСПЫШЕЧНОГО КОМПЛЕКСА АКТИВНОСТИ НА СОЛНЦЕ В МАЕ-ИЮНЕ 2024 ГОДА

Е.С. Исаева [1], В.М. Томозов [2], С.А. Язев [1,2]

[1]Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия,
ele3471@yandex.ru
[2]Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

FEATURES OF EVOLUTION OF THE COMPLEX OF ACTIVITY ON THE SUN IN MAY-JUNE 2024

Isaeva E.S.[1], Tomozov V.M.[2], Yazev S.A.[1,2]

[1]Irkutsk State University, Irkutsk, Russia, ele3471@yandex.ru
[2]Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

Аннотация. Работа посвящена изучению феноменологии крупной активной области (АО) NOAA 13664, наблюдавшейся в мае 2024 г. В этой области зарегистрирована серия сильных вспышек рентгеновского класса X. С использованием магнитограмм и изображений в белом свете, полученных космическими обсерваториями SDO и Solar Orbiter (последние – с обратной стороны Солнца), показано, что АО NOAA 13697 представляет собой результат непрерывной эволюции АО 13664. Показано также, что АО 13664+13697 можно представить как ядро комплекса активности (КА), развивавшегося на протяжении пяти кэррингтоновских оборотов. Построены зависимости от времени таких параметров, как площадь АО в пределах изогауссы 50 Гс, магнитный поток для каждой полярности, а также баланс магнитного потока. Показано, что рост значений потока происходил не монотонно. Это и другие обстоятельства (характер появления новых пятен в АО) позволяют предполагать, что в области последовательно всплывали новые порции магнитного потока в форме новых биполярных структур в пределах одной АО. Эти структуры, взаимодействуя друг с другом, генерировали процессы магнитного пересоединения, что породило серию мощных вспышек.

Ключевые слова: солнечная активность, вспышки, Солнце, комплексы активности

Abstract. This paper studies the phenomenology of the large active region (AR) NOAA 13664 observed in May 2024. A series of strong X-ray flares was recorded in this region. Using magnetograms and white-light images obtained by the SDO and Solar Orbiter space observatories (the latter from the far side of the Sun), AR NOAA 13697 is shown to be the result of the continuous evolution of AR 13664. It is also shown that AR 13664+13697 can be represented as the core of an activity complex (AC) that evolved over five Carrington rotations. The time dependencies of such parameters as the AR area within the 50 G isogauss, the magnetic flux for each polarity, and the magnetic flux balance are plotted. It was shown that the increase in flux values was not monotonous. This circumstance and other ones (the nature of appearance of new spots in AR) suggest that new portions of magnetic flux sequentially emerged in the region in the form of new bipolar structures within a single AR. These structures, interacting with each other, generated magnetic reconnection processes, which gave rise to a series of powerful flares.

Keywords: solar activity, flare, Sun, complex of activity

ВВЕДЕНИЕ

В 2024 г. в южном полушарии Солнца наблюдалась гигантская долгоживущая активная область (АО), нумерация NOAA в мае № 13664, в июне № 13697. В мае здесь наблюдались 11 вспышек рентгеновского класса X, в июне – 5 таких событий [Ying Li et al, 2024, Hayakawa et al, 2025, Isaeva, Yazev, 2025, Yazev et al., 2025]. Ряд вспышек сопровождался выбросами коронального вещества (КВМ), которые породили сильнейшую геомагнитную бурю 10 – 12 мая. Она стала седьмой по мощности за период, начиная с 1957 года. [Yasyukevich et al, 2025].

Настоящая работа посвящена особенностям развития указанной АО.

ПРИНАДЛЕЖНОСТЬ ВСПЫШЕЧНОЙ АО К КОМПЛЕКСАМ АКТИВНОСТИ

Согласно концепции, развиваемой в ИСЗФ СО РАН и ИГУ, начиная с 1983 г. и заложенной В.Г.Баниным, особое место в ряду АО на Солнце занимают так называемые комплексы активности (КА). Если на протяжении трех солнечных оборотов подряд в одном и том же месте на площадке в пределах 20 на 20 гелиографических градусов наблюдаются пятна, такой участок солнечной поверхности идентифицируется как ядро комплекса активности. Это может быть одна АО, либо несколько АО последовательно возникающих одна за другой. АО, находящиеся в пределах 20 градусов от ядра КА и связанные с ним единой системой магнитных полей, именуются ветви КА [Yazev et al., 2021].

Анализ пространственно-временного расположения АО на солнечной поверхности показал, что крупные АО 13664 и 13697 развивались в составе ядра КА, которое наблюдалось на протяжении 5 кэррингтоновских оборотов (2284 – 2288) начиная с мая по сентябрь 2024 г. Анализ данных, полученных космической обсерваторией Solar Orbiter [https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Solar_Orbiter], находившейся в мае-июне 2024 с обратной стороны Солнца, позволил сделать вывод, что АО 13697 является не новой группой пятен, а представляет собой результат непрерывной эволюции АО 13664.

ЭВОЛЮЦИЯ КА В МАЕ-ИЮНЕ 2024 Г.

Эволюция зоны I. Уже существующая АО 13664 вышла из-за восточного лимба Солнца 2 мая 2024. Ее магнитная структура изначально была биполярной и сравнительно простой: наблюдалось головное пятно и окружающая его обширная зона отрицательной (далее S-) полярности, где магнитное поле было структурировано, группируясь на границах супергранул. Меридиональный участок линии раздела полярностей (ЛРП) отделял головную часть АО от хвостовой, где первоначально отмечалась группа небольших разрозненных пятен положительной (далее N-) полярности. В течение 3 – 5 мая в указанной хвостовой области быстро нарастало количество пятен, суммарная площадь и напряженность поля. Вырастали размеры крупного хвостового пятна N-полярности, где в пределах одной полутени формировались многочисленные ядра (элементы тени) пятна. Эта зона на рис. 1 обозначена номером I. На протяжении 3 – 5 мая магнитная структура этой зоны усложнялась: 3 мая к югу от хвостовых пятен N-полярности вплотную к ним появилось новое пятно S- полярности. 3 – 5 мая выстраивалась полоса S-поля, соединившая указанное новое пятно с головным пятном зоны I – здесь возникла цепочка пор. Соответственно, сравнительно короткий квази-меридиональный участок ЛРП между головной и хвостовой областями зоны I удлинился не менее чем в три раза, вытягиваясь теперь вдоль параллели.

Эволюция зоны III. К востоку от этой бурно развивающейся АО начиная с 2 мая наблюдалось одиночное небольшое пятно А без полутени S-полярности, не имеющее номера в номенклатуре NOAA. Вплоть до своего исчезновения 6 мая оно фактически не эволюционировало. 3 мая к юго-востоку от указанного пятна А появилась группа пор N-полярности (развивалась биполярная группа пятен). Однако 5 мая между первым головным пятном А и хвостовой частью этой АО возникла и стала быстро увеличиваться цепочка новых пятен S-полярности, а синхронно с ней – новые хвостовые пятна N-полярности, также быстро растущие. Новые головные пятна растущей АО спустя сутки распространились на область, где ранее находилось исчезнувшее 6 мая пятно А. Очевидно, что 5 мая в результате выхода из-под фотосферы новой порции магнитного потока начала развиваться новая АО, получившая номер 13668. Зона, где развивалась эта АО, обозначена на рис. 1 цифрой III. Следует отметить, что изначально расстояние между границами зон I и III составляло около 10 градусов, и активность в указанных зонах развивалась независимо.

Эволюция зоны II. К концу 5 мая восточнее мощного хвостового пятна N-полярности зоны I (между зонами I и III) возникла и стала быстро расти в размерах новая биполярная структура (показана на рис.1 цифрой II). Растущее головное пятно S-полярности вплотную приблизилось к хвостовому пятну N-полярности зоны I АО 13664. Пятна новой зоны II не получили отдельного номера NOAA – новые пятна были отнесены к уже существующей АО 13664. Тем не менее, анализ эволюции магнитных полей пятен показывает, что появление пятен в зоне II связано с выходом из-под фотосферных слоев очередной порции магнитного потока в виде крупных пятен, при этом новое головное пятно зоны II оказалось вплотную к хвостовому пятну зоны I – их полутени объединились, сформировав 6 мая крупное сложное пятно с дельта-конфигурацией (включающее ядра обеих полярностей в пределах одной полутени).

К 6 мая сформировался гигантский комплекс АО 13664 + 13668. Изначально сравнительно простая магнитная структура, которую можно представить в виде трех последовательно сформировавшихся биполярных систем в зонах I, III и II. Взаимодействие этих систем, включавшее смещение магнитных элементов, привело к чрезвычайно сложной магнитной структуре. Тесно примыкающие друг к другу области противоположной полярности на юге зоны I, на стыке зон I и II, а также на северо-востоке комплекса на границе II и III, по-видимому, обеспечили условия для пересоединения разноуровневых магнитных систем и, в итоге, к генерации сильных вспышек.

Указанные зоны пятнообразования показаны на рис. 1. Эволюция КА связана с последовательным появлением вблизи друг от друга нескольких квазидипольных магнитных структур, объединившихся в единый сложный магнитный комплекс.

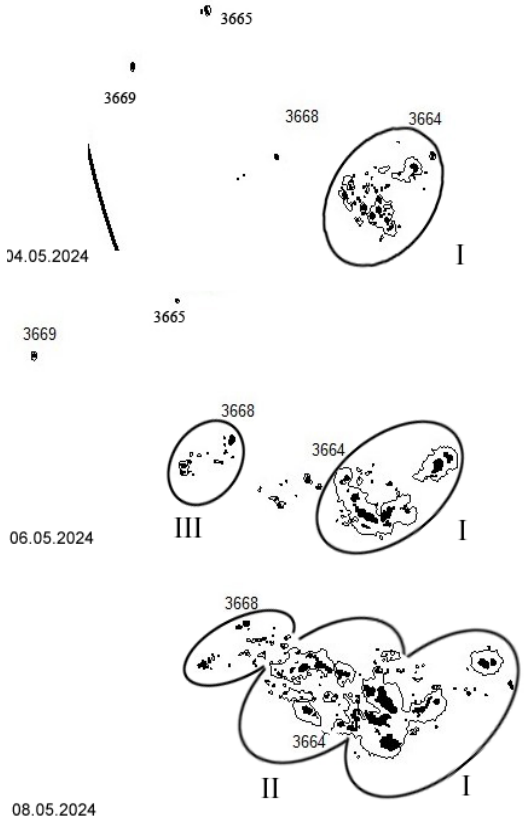

Рис. 1. Развитие АО 13664 4 – 8 мая 2024. Зоны пятнообразования условно показаны овалами

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Развитие исследуемого КА привлекает внимание прежде всего в связи с его высокой вспышечной активностью. Мощные вспышки класса X в АО 13664 следовали одна за другой с интервалом, иногда не превышавшим 5 часов.

Энергия, выделившаяся в этих вспышках в течение месяца, превышала суммарную энергию вспышек, отмеченных от начала 25 цикла до рассматриваемого вспышечного эксцесса. Очевидно, что такая энергетика КА может быть связана с двумя возможными причинами: либо КА накопил большой запас свободной магнитной энергии и расходовал его частыми актами релаксации, либо имела место постоянная «подпитка» КА энергией в виде (например) регулярного всплытия из-под фотосферы новых порций магнитного потока.

Исследование серии магнитограмм и фотогелиограмм, полученных космическими обсерваториями SDO и Solar Orbiter в период вспышечной активности КА показало, что а) действительно наблюдалось появление новых областей сильного магнитного поля в виде быстро растущих пятен, что привело к увеличению суммарной площади КА до рекордных значений в текущем цикле, и б) наблюдался волнообразный характер изменений суммарной площади пятен КА и значений суммарного магнитного потока КА, что также может интерпретироваться как свидетельство постоянного всплытия новых порций магнитного потока. Всплытие новых элементов поля привело к быстрому удлинению и усложнению формы линии раздела полярностей, что также является прогностическим признаком высокой вспышечной активности АО [Dhakal, Zhang, 2024]. Взаимодействие (пересоединение) старых и постоянно всплывающих новых магнитных полей привело к последовательности сильных вспышек и КВМ.

Само существование эффективного канала, по которому на протяжении как минимум месяца непрерывно всплывали порции магнитного потока авторы связывают с гипотезой о существовании крупномасштабной конвективной ячейки с характерным размером порядка глубины конвективной зоны. Существование таких ячеек считается подтвержденным [Hathaway et al., 2013]. В центральной части такой ячейки восходящий поток вещества мог увлекать за собой магнитное поле с уровня тахоклина до уровня фотосферы, что и привело к серии сильных вспышек.

Авторы благодарны командам проектов SDO и Solar Orbiter за возможность использования данных этих космических обсерваторий. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (субсидия № 075-ГЗ/Ц3569/278, а также госзадание FZZE 2026-0006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Dhakal S.K. , Zhang J. What Are the Causes of Super Activity of Solar Active Regions? // The Astrophysical Journal, 2024, 960, 36 (18pp)

Isaeva E.S., Yazev S.A. Solar flare excess in 2024 // Astronomical and Astrophysical Transactions (AApTr), 2025, Vol. 35, Issue 4, p. 349–354

Hathaway, D. H., Upton, L., & Colegrove, O. (2013). "Giant Convection Cells Found on the Sun." Science, Vol. 342, Issue 6163, p. 1217-1219

Hayakawa H., Ebihara Yu., Mishev A., Koldobskiy S., Kusano K., Bechet S., Yashiro S., Iwai K., Shinbori A., Mursula K., Miyake F., Shiota D., Marcos V., Silveira D., Stuart R., Oliveira D.M., Akiyama S., Ohnishi K., Ledvina V., and Miyoshi Y. // Astrophys J., 2025, 979, 49 (26pp)

Yasyukevich Yu. V., Vasiliev R. V., Rubtsov A. V., Alsatkin S. S., Artamonov M. F., Beletsky A. B., Belinskay A. Yu., Berngardt O. I., Vesnin A. M., Ganitsky D. A., Egorov Ya. I., Academician Zherebtsov G. A., Zolotukhina N. A., Ivanova V. A., Ivonin V. A., Isaeva E. S., Kim A. G., Kravtsova M. V., Kurkin V. I., Kushnarev D. S., Lebedev V. P., Marchuk R. A., Corresponding Member of the RAS Medvedev A. V., Mikhalev A. V., Oinats A. V., Olemskoy S. V., Podlesny A. V., Podlesny S. V., Ponomarchuk S. N., Ratovsky K. G., Sdobnov V. E., Setov A. G., Syrenova T. E., Tashlykov V. P., Tkachev I. D., Fainshtein V. G., Cedric M. V., and. Yazev S. A. Extreme Magnetic Storm of May 10–19, 2024: Coupling between Neutral and Charged Components of the Upper Atmosphere and the Effect on Radio Systems // Doklady Earth Sciences, Atmospheric and Hydrospheric Physics, 2025, Vol. 520:33.

Yazev S.A., Isaeva E.S., and Tomozov V.M. Activity Complexes on the Sun in the growth phase of the 25th cycle of Solar Activity // Moscow University Physics Bulletin 80 (7), (2025), Journal Section or Conference Section.

Yazev S.A., Isaeva E. S., and Ishmukhametova Yu. V. Active Regions on the Sun with Increased Flare Activity in Cycle 24 // Astronomy Reports, 2021, Vol. 65, No. 6, p. 507–517.

Ying Li, Xiaofeng Liu, Zhichen Jing, Wei Chen, Qiao Li, Yang Su, De-Chao Song , M. D. Ding, Li Feng, Hui Li, and Weiqun Gan // Various Features of the X-class White-light Flares in Super Active Region NOAA 13664. The Astrophysical Journal Letters, 2024, 972, L1 (8pp)

URL: https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Solar_Orbiter (дата обращения 12.04.2026).