Секция А. Астрофизика и физика Солнца. БШФФ-2026. С. 70–73.

УДК 523.98
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-70
ORCID: 0009-0007-7045-7144, 0009-0006-1305-718X

ПРОВЕРКА КЛАССИФИКАЦИИ КОРОНАЛЬНЫХ ЯРКИХ ТОЧЕК ПО СПУТНИКОВЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ SDO И HINODE

Н.В. Карачик, Е.П. Миненко

Астрономический институт Академии наук Республики Узбекистан, Ташкент, Узбекистан,
ninakarachik@mail.ru

VERIFICATION OF CORONAL BRIGHT POINT CLASSIFICATION USING SDO AND HINODE OBSERVATIONS

N.V. Karachik, E.P. Minenko

Ulugh Beg Astronomical Institute, Uzbekistan Academy of Sciences, Tashkent, Uzbekistan,
ninakarachik@mail.ru

Аннотация. Исследованы долговременные изменения числа корональных ярких точек (КЯТ) по данным SDO/AIA 211 Å и Hinode/XRT за период 2008–2026 гг. Для выделения КЯТ использовался автоматический алгоритм идентификации, адаптированный для данных обоих инструментов. Показано, что число КЯТ в обоих наборах данных антикоррелирует с числом солнечных пятен, достигая максимума в минимуме солнечной активности. Разделение КЯТ на подгруппы по максимальной интенсивности выявило существование двух статистически различимых популяций: тусклые КЯТ демонстрируют отрицательную корреляцию с солнечным циклом, тогда как яркие КЯТ коррелируют с числом солнечных пятен. Полученные результаты подтверждают гипотезу о различном физическом происхождении двух популяций КЯТ и их связи с глобальным и локальным магнитным динамо.

Ключевые слова: корональные яркие точки; солнечная корона; солнечный цикл.

Abstract. Long-term variations in the number of coronal bright points (CBPs) were investigated using SDO/AIA 211 Å and Hinode/XRT observations covering the period from 2008 to 2026. An automatic identification algorithm adapted for both instruments was used to detect CBPs. The results show that the number of CBPs in both datasets is anticorrelated with the sunspot number, reaching a maximum during solar minimum. Dividing CBPs into subgroups according to their maximum intensity revealed the existence of two statistically distinct populations: faint CBPs exhibit a negative correlation with the solar cycle, whereas bright CBPs are positively correlated with the sunspot number. The obtained results support the hypothesis that these two CBP populations have different physical origins and are associated with the global and local magnetic dynamo processes.

Keywords: coronal bright points; solar corona; solar cycle.

ВВЕДЕНИЕ

Корональные яркие точки (КЯТ) являются одним из наиболее распространённых проявлений мелкомасштабной активности в солнечной короне вне активных областей. Они наблюдаются в рентгеновском и крайнем ультрафиолетовом диапазонах как компактные области повышенной яркости и связаны с небольшими биполярными магнитными структурами и процессами локального выделения магнитной энергии в короне [Vaiana et al., 1973; Golub et al., 1977; Sheeley, Golub, 1979]. Несмотря на многолетние исследования, связь КЯТ с солнечным циклом остаётся не до конца понятной. Ранние работы показали, что число КЯТ может изменяться в противофазе с числом солнечных пятен, тогда как более поздние исследования указывают на существование КЯТ, как коррелирующих, так и антикоррелирующих с солнечной активностью [Sattarov et al., 2010].

Наблюдения широтного распределения КЯТ и их статистических свойств позволили предположить существование как минимум двух популяций КЯТ различного физического происхождения [McIntosh, Gurman, 2005; Sattarov et al., 2010; Karachik, 2025]. Предполагается, что яркие КЯТ связаны с распадом активных областей и глобальным магнитным динамо, тогда как тусклые КЯТ могут формироваться в магнитных полях спокойного Солнца, поддерживаемых локальными турбулентными динамо-процессами.

Современные наблюдения высокого разрешения, выполняемые инструментами SDO/AIA и Hinode/XRT, позволяют проверить данную гипотезу на независимых наборах данных, охватывающих 24-й солнечный цикл и фазу роста 25-го цикла. В данной работе используется автоматический алгоритм обнаружения КЯТ, адаптированный для данных обоих инструментов. Целью работы является исследование долговременных изменений числа КЯТ и проверка гипотезы о существовании двух популяций КЯТ с различной зависимостью от солнечного цикла.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В данной работе используются два набора данных: наблюдения инструмента Atmospheric Imaging Assembly (AIA), в полосе 211 Å на борту Solar Dynamics Observatory (SDO), а также данные с телескопа X-ray Telescope (XRT) на борту обсерватории Hinode. Данные AIA/SDO были обработаны и откалиброваны с помощью стандартной процедуры SolarSoft `aia_prep`, выполняющей коррекцию плоского поля и тёмного тока, удаление следов космических лучей, нормировку по времени экспозиции и коррекцию долговременной деградации. В

результате был получен однородный набор данных, пригодный для долговременного статистического анализа.

Второй набор данных состоял из изображений XRT/Hinode уровня Level-2, представляющих собой полно-дисковые композитные изображения размером 1024 × 1024 пикселей. Для анализа использовались данные из архива [https://xrt.cfa.harvard.edu/data_products/Level2_Synoptics/]. К изображениям уже была применена стандартная процедура предварительной обработки, аналогичной процедуре `xrt_prep`, со всеми необходимыми корректировками. Кроме того, качество изображений было дополнительно улучшено с использованием других методов [Takeda et al., 2016]. Из восьми диагностических фильтров XRT для детального анализа были выбраны изображения, полученные с фильтром Al-mesh, поскольку именно для него имеются непрерывные наблюдения, а уровень рассеянного света остаётся незначительным на протяжении всего исследуемого периода.

Также в работе использовались временные ряды среднемесячных значений числа солнечных пятен (SSN) (версия 2.0), предоставленные Всемирным центром данных –WDC–SILSO, Королевской обсерваторией Бельгии [http://www.sidc.be/silso/datafiles].

Корональные яркие точки были выделены с помощью автоматической процедуры, разработанной для минимизации субъективного влияния наблюдателя и сокращения времени обработки данных. Используемая процедура аналогична применявшейся ранее для данных EIT/SOHO в работах [Sattarov et al., 2010; Karachik, 2025], однако была адаптирована для изображений AIA/SDO и XRT/Hinode. На рисунке 1 приведены примеры работы использованной процедуры для идентификации КЯТ. Зеленые контуры показывают КЯТ, автоматически выделенные используемым алгоритмом.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Адаптированный алгоритм идентификации КЯТ был применен к используемым двум наборам данных за весь доступный период наблюдений: для данных AIA/SDO – с 2010 по 2026 год, а для XRT/Hinode – с 2008 по 2026 год. Кривые изменения общего числа КЯТ приведены на рисунке 2: черным цветом обозначено число КЯТ по данным XRT/Hinode, синим - AIA/SDO, кривая изменения числа солнечных пятен обозначена красным цветом. Как видно из рисунка, оба набора данных показывают антикорреляцию числа КЯТ с числом солнечных пятен, достигая максимума в минимуме солнечной активности, что полностью согласуется с результатами, полученными другими авторами [Madjarska, 2019]. Также наблюдается отмеченная ранее температурная зависимость числа наблюдаемых КЯТ: в диапазоне с более низким температурным откликом, наблюдается большее число КЯТ – в нашем случае, на снимках AIA/SDO 211 Å больше КЯТ чем на XRT/Hinode. Среднее число КЯТ на снимках AIA/SDO 211 Å – 332, а на XRT/Hinode – 217. Амплитуда циклических изменений тоже отличается – для снимков AIA/SDO 211 она на 15% больше, чем для снимков XRT/Hinode. Как видно из рисунка 2, увеличенная амплитуда изменений числа КЯТ в полосе 211 Å вызвана резким увеличением числа КЯТ в минимуме солнечной активности, тогда как в максимуме число КЯТ в обоих наборах данных было близким.

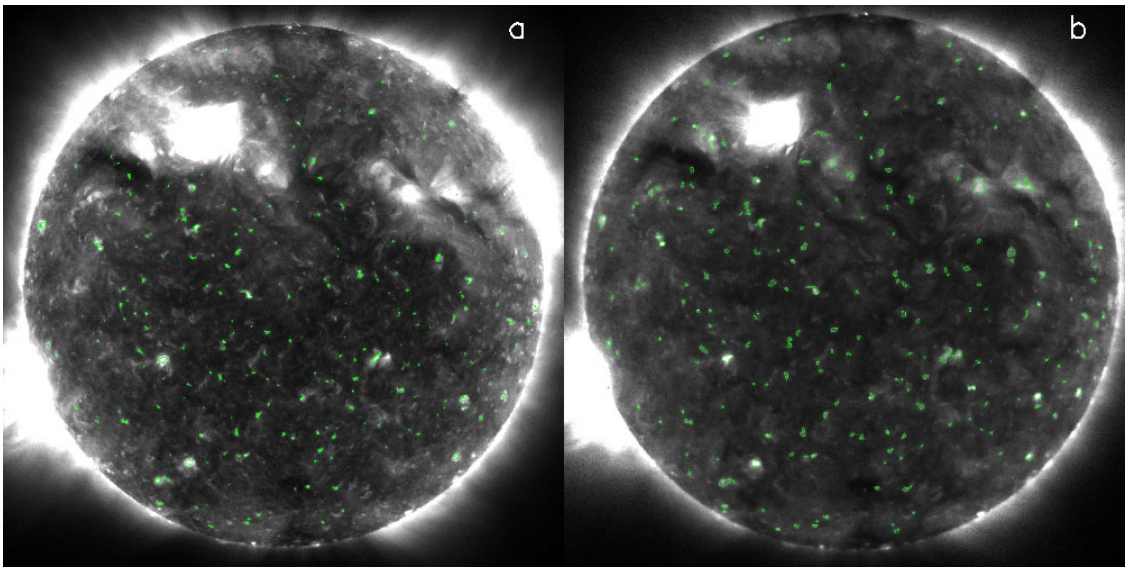

Рис. 1. Изображения полного диска Солнца, полученные с помощью инструментов AIA/SDO 211(a) и XRT/Hinode (b) за 3 ноября 2010 года. Зеленые контуры показывают выявленные нашей программой корональные яркие точки

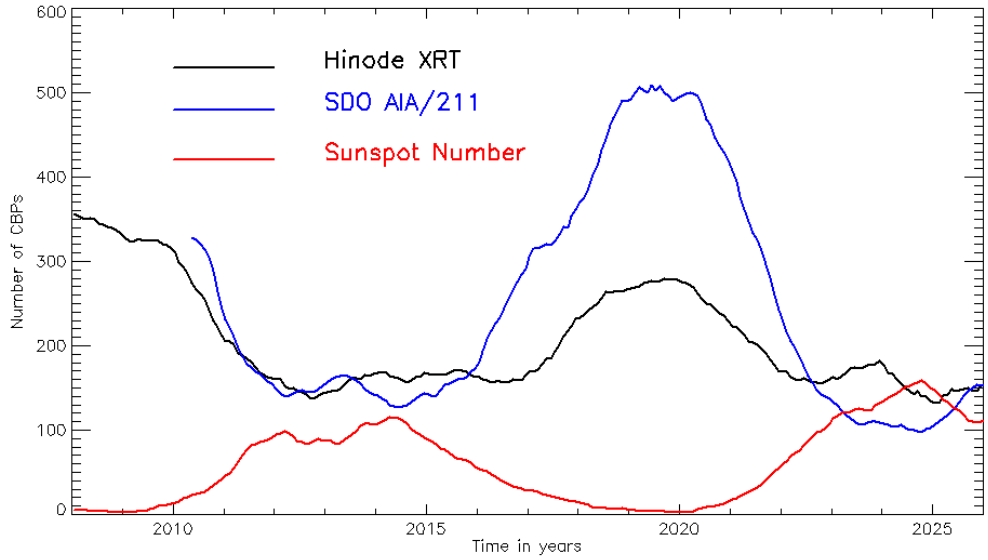

Рис. 2. Временное изменение числа корональных ярких точек на снимках XRT/Hinode (черным), AIA/SDO (синим) и изменение международного числа солнечных пятен SSN (красным)

Следуя методике разделения мелкомасштабных магнитных элементов в работе [Jin et al., 2011] и КЯТ по данным EIT/SOHO [Karachik, 2025] мы разделили все КЯТ на подгруппы с узким диапазоном максимальной интенсивности. Для каждой подгруппы был вычислен линейный коэффициент корреляции Пирсона между изменением числа КЯТ и международным числом солнечных пятен. Результаты за весь период показаны на рис. 3 Подгруппы, имеющие невысокую статистическую значимость корреляции, обозначены на графиках синим цветом.

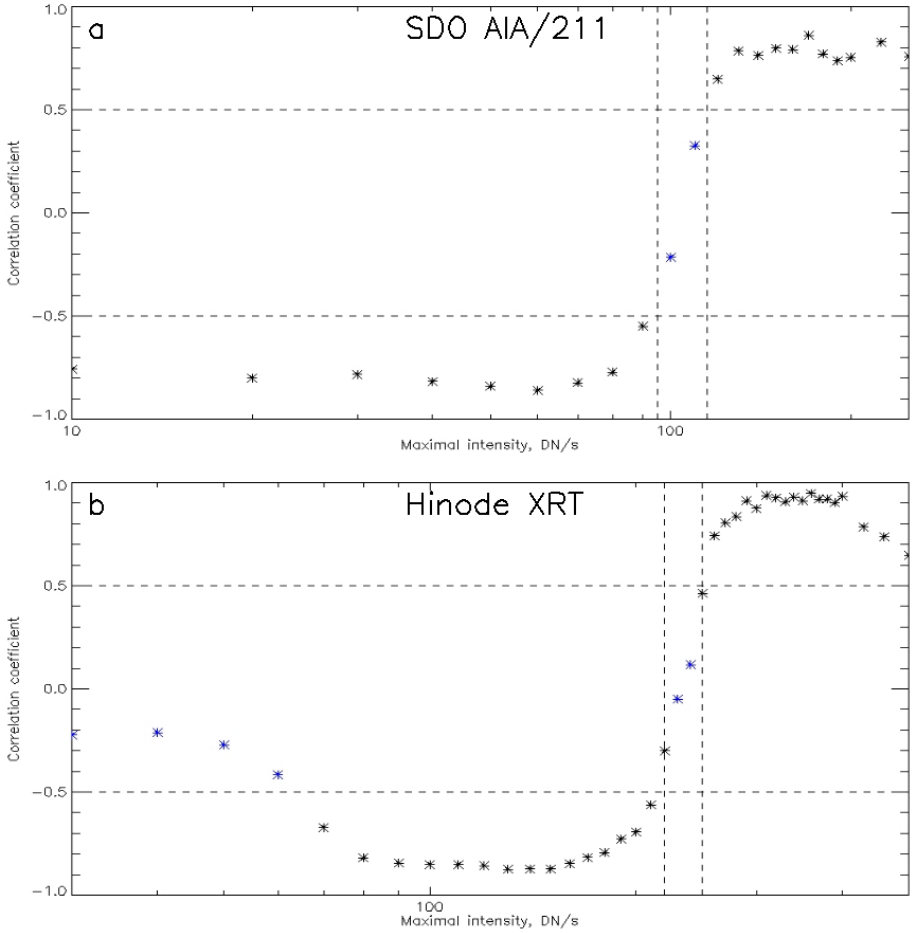

Рис. 3. Коэффициенты корреляции между числом солнечных пятен и числом КЯТ по данным AIA/SDO 211 Å (a) и XRT/Hinode (b) для каждой из подгрупп в зависимости от интенсивности

Рисунок 3 наглядно демонстрирует, что оба набора данных подтверждают предположение о наличии двух статистически различимых популяций КЯТ: одной популяции, с более низкими значениями максимальной интенсивности, соответствуют отрицательные коэффициенты корреляции, со значениями менее -0.5, а другой группе – с более высокими значениями максимальной интенсивности, характерны коэффициенты корреляции более 0.5. Первая группа названа тусклыми КЯТ, а вторая – яркими. Горизонтальными пунктирными линиями обозначены пороговые значения коэффициентов корреляции, принятые за 0.5 и -0.5. Вертикальными пунктирными линиями обозначены границы интенсивности при переходе от одной группы в другую. Между этими вертикальными пунктирными линиями расположена так называемая переходная зона, возможно, включающая в себя КЯТ обеих популяций. Статистическая значимость корреляции в данной группе невысокая, поэтому мы не рассматриваем их как отдельную группу КЯТ.

Особенно важно, что аналогичное разделение на две популяции наблюдается независимо в данных AIA/SDO и XRT/Hinode, работающих в различных диапазонах длин волн и температурных откликах.

В качестве физической интерпретации существования двух типов КЯТ и мелкомасштабных магнитных элементов предлагается гипотеза о связи ярких КЯТ с магнитными элементами, образованными в результате работы глобального магнитного динамо, а тусклые в результате работы локального турбулентного динамо. Первый механизм может быть связан с распадом активных областей и образованием на их остатках корональных ярких точек и со всплытием эфемерных активных областей, которые недостаточны для образования солнечных пятен. Поэтому число ярких КЯТ меняется синхронно с числом солнечных пятен. Их число в наших двух наборах данных примерно одинаковое. Число тусклых КЯТ, наоборот, демонстрирует значимую отрицательную корреляцию с числом солнечных пятен, что возможно связано с уменьшением общей площади спокойного Солнца, где могут образовываться КЯТ данного типа, а также возможно вызваны подавлением глобальным динамо эффективности локального турбулентного динамо. К такому выводу пришли авторы работы [Karak, Brandenburg, 2016], основанной на моделировании совместной работы двух динамо. С точки зрения данной гипотезы объяснимо различие в изменении числа КЯТ в наших наборах данных – в максимум солнечной активности, когда в популяции КЯТ преобладают яркие – число в обеих полосах оказывается близким, но в минимуме, когда превалирует число тусклых наблюдается максимальное расхождение в числе со значительным перевесом в полосе с меньшим температурным откликом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый анализ данных AIA/SDO 211 Å и XRT/Hinode за период 2008–2026 гг. показал, что число корональных ярких точек в обоих диапазонах демонстрирует выраженную антикорреляцию с солнечным циклом. При этом в полосе AIA/SDO 211 Å наблюдается большее среднее число КЯТ и более высокая амплитуда циклических изменений, что главным образом связано с увеличением числа тусклых КЯТ в минимуме солнечной активности.

Разделение КЯТ по интенсивности подтвердило существование двух статистически различимых популяций. Яркие КЯТ демонстрируют положительную корреляцию с числом солнечных пятен и, вероятно, связаны с магнитным потоком активных областей и глобальным солнечным динамо. Тусклые КЯТ, напротив, характеризуются отрицательной корреляцией с солнечной активностью и могут быть связаны с локальными турбулентными динамо-процессами в областях спокойного Солнца. Полученные результаты свидетельствуют о сложной многокомпонентной природе корональных ярких точек и подтверждают устойчивость модели двух популяций на данных независимых инструментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Golub L., Krieger A.S., Harvey J.W., Vaiana G.S. Magnetic properties of X-ray bright points // Solar Phys. 1977. V. 53. P. 111–121.

Jin C.L., Wang J.X, Song Q., Zhao H. The Sun's Small-Scale Magnetic Elements in Solar Cycle 23 // Astrophys. J. 2011. V. 731, N 1. Article 37.

Karachik N.V. Two types of coronal bright points as indicators of global and local dynamo processes // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2025. V. 543, N 4. P. 3975-3980.

Karak B.B., Brandenburg A. Is the Small-Scale Magnetic Field Correlated with the Dynamo Cycle? // Astrophys. J. 2016. V. 816, N 1. Article 28.

Madjarska M.S. Coronal bright points // Living Rev. Solar Phys. 2019. V. 16. Article 2.

McIntosh S.W., Gurman J.B. Nine years of EUV bright points // Solar Phys. 2005. V. 228, N 1–2. P. 285–299.

Sattarov I., Pevtsov A.A., Karachik N.V., Sherdanov C.T., Tillaboev A.M. Solar Cycle 23 in Coronal Bright Points // Solar Phys. 2010. V. 262, N 2. P. 321-335.

Sheeley N.R., Golub L. Rapid changes in the fine structure of a coronal Bright point and a small coronal "active region" // Solar Phys. 1979. V. 63, N 1. P. 119–126.

Takeda A., Yoshimura K., Saar S.H. The Hinode/XRT Full-Sun Image Corrections and the Improved Synoptic Composite Image Archive // Solar Phys. 2016. V. 291, N 1. P. 317–333.

Vaiana G.S., Krieger A.S., Timothy A.F. Identification and analysis of structures in the corona from X-ray photography // Solar Phys. 1973. V. 32, N 1. P. 81–116.

URL: http://www.sidc.be/silso/datafiles (дата обращения 21.05.2026)

URL: https://xrt.cfa.harvard.edu/data_products/Level2_Synoptics/ (дата обращения 21.05.2026)