

Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 120, № 3, 5–11 (2024)

УДК 523.98

Ультрафиолетовое излучение униполярных активных областей и связь его интенсивности со скоростью потери магнитного потока

А.А. Плотников

ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», Научный, 298409, Крым
plotnikov.andrey.alex@yandex.ru

Поступила в редакцию 23 июля 2024 г.

Аннотация. По данным спутника Solar Dynamics Observatory для 617 активных областей (АО) проведено сравнение значений интенсивности ультрафиолетового (УФ) излучения в линии He II 304 Å и полного беззнакового магнитного потока. Получено, что для биполярных и мультиполярных АО плотность УФ-излучения над пятном слабо зависит от их магнитного потока. Плотность излучения над пятнами униполярных АО оказывается в среднем ниже и растет с увеличением магнитного потока. Скорость затухания магнитного потока АО показывает корреляцию с плотностью УФ-излучения над пятнами.

Ключевые слова: Солнце, активные области, диссипация магнитного потока

1 Введение

В работе Plotnikov et al. (2023) было показано наличие степенной зависимости между скоростью потери магнитного потока в активной области (АО) и максимальной величиной магнитного потока в ней. При этом был обнаружен кластер униполярных АО, демонстрирующих скорость затухания заметно меньшую, чем это ожидалось бы из степенного закона (опираясь на величину магнитного потока в этих АО). Стоит отметить, что здесь и далее под униполярной понимается АО, в хвостовой полярности которой отсутствуют видимые в белом свете пятна и поры.

Ввиду того, что начало процесса затухания для таких АО не наблюдается (АО выходит из-за лимба уже в фазе затухания), представляет интерес изучение их поведения за солнечным лимбом.

Для этих целей возможно использовать данные космических обсерваторий, способных наблюдать Солнце с ракурсов, существенно отличающихся от земного. Аппарат Solar Orbiter (Müller et al., 2013) с помощью инструмента PHI способен давать данные о магнитном поле в АО, однако его наблюдения покрывают интервал только с 2020 года и не являются непрерывными и однородными. Для анализа более раннего временного интервала пригодны аппараты Solar TERrestrial RELations Observatory (STEREO; Kaiser et al., 2008), которые также позволяют наблюдать Солнце с других ракурсов, но не несут на борту приборов для получения магнитограмм АО.

Известно, что ультрафиолетовое (УФ) излучение является прокси-величиной для полного беззнакового магнитного потока: величины связаны между собой степенной зависимостью (Schrijver, 1987). В работе Ugarte-Urra et al. (2015) с использованием данных инструмента STEREO/SECCHI/EUVI для некоторых АО были построены непрерывные графики долговременной (до 80 дней) вариации УФ-излучения, которые могут быть пересчитаны в значения магнитного потока.

Визуальный анализ показал, что УФ-излучение над униполярными АО значительно ослаблено. В определенных случаях в зоне около пятна вообще не наблюдалось УФ-излучения, заметно выделяющегося на уровне фона. Разумеется, данный факт затрудняет использование УФ-излучения для оценки магнитного потока таких АО.

Целью данной работы является статистическая проверка наличия дефицита УФ-излучения в униполярных АО. Также интерес представляет вопрос о том, связан ли такой дефицит с низкой скоростью затухания магнитного потока в АО.

2 Данные и методы

Для работы были использованы данные аппарата Solar Dynamics Observatory (SDO; [Pesnell et al., 2012](#)). На его борту размещены инструменты Helioseismic Magnetic Imager (HMI; [Scherrer et al., 2012](#)) и Atmospheric Imaging Assembly (AIA). HMI предоставляет полнодисковые карты вектора магнитного поля, лучевых скоростей и интенсивности континуума. AIA регистрирует полнодисковые фильтрограммы в нескольких линиях УФ-диапазона.

Данные HMI использовались в виде SHARP CEA – автоматически выделенных патчей АО с преобразованием декартовых координат в цилиндрические (гелиографические) координаты ([Bobra et al., 2014](#)). Для каждой АО выбирались патчи, координаты которых удалены от центрального меридиана не более чем на 60 градусов. Интервал между патчами составлял 6 часов.

Для каждого патча выбиралась наиболее близкая по времени карта AIA. Использовался канал 304 Å, соответствующий линии He II, формирующейся в нижней части переходного слоя. Изображение AIA содержит фильтрограмму полного диска Солнца на определенной длине волны. Для сопоставления карт HMI и AIA изображение AIA было преобразовано в гелиоцентрические координаты, затем из него был выделен прямоугольный участок, по координатам соответствующий патчу SHARP CEA.

Проанализировано 617 АО, наблюдавшихся с 2010 по 2017 годы. Униполярными являлись 87 АО из выборки.

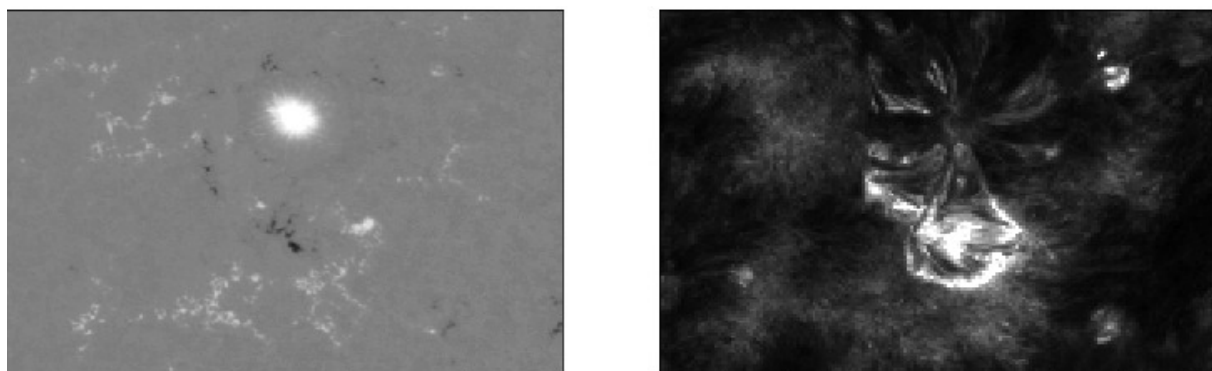


Рис. 1. Магнитограмма продольной компоненты магнитного поля (слева) и изображение в линии 304 Å (справа) АО NOAA 11599, наблюдавшейся 2012/10/31 в 06:00 UT. Размер патча в гелиографических координатах $10.75^\circ \times 14.46^\circ$. Заметно, что малый биполярный элемент в нижней части карты генерирует УФ-излучение, значительно превышающее излучение от крупного униполярного элемента в верхней части карты

Стоит отметить, что в некоторых АО небольшие биполярные элементы могут давать УФ-излучение, заметно превышающее излучение над пятнами (см. пример на рис. 1). Таким образом, интегральная интенсивность УФ-излучения от всего патча не может быть использована в качестве величины, соответствующей УФ-излучению над пятнами АО, так как будет существенно зависеть от количества появляющихся элементов и, соответственно, от площади патча.

В связи с этим исследовалось УФ-излучение только в зоне пятна и его ближайших окрестностей, для чего применялась маска. Для всех пятен, принадлежащих АО, вычислялся эффективный радиус

$$r_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{S}{\pi}},$$

где S – площадь пятна в пикселях, вычисленная как площадь внутри изолинии с излучением в белом свете ниже, чем 0.65 от интенсивности спокойного Солнца. Другими словами, r_{eff} – радиус круга, по площади равного пятну. Маска определялась как круг радиусом $5r_{\text{eff}}$ с центром в принадлежащем пятну пикселе с наименьшей интенсивностью белого света. Окончательная маска определялась как дизъюнкция (объединение) всех масок пятен, принадлежащих АО. Пример выделения маски показан на рис. 2.

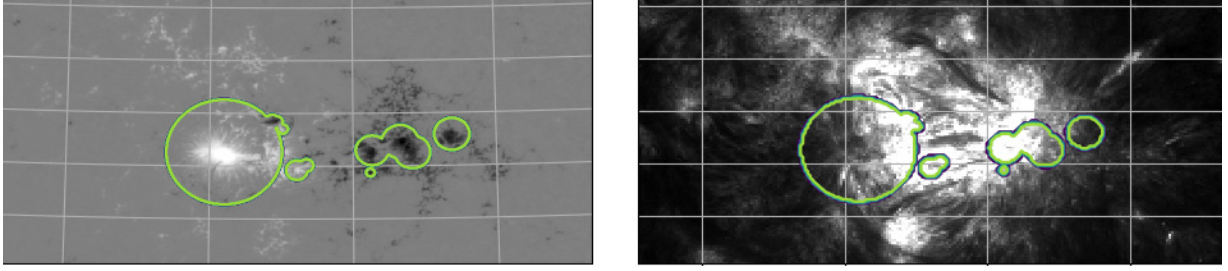


Рис. 2. Магнитограмма продольной компоненты магнитного поля (слева) и изображение в линии 304 Å (справа) АО NOAA 11484, наблюдавшейся 2012/05/20 в 12:00 UT. Размер патча в гелиографических координатах $10.06^\circ \times 20.38^\circ$. Зеленой линией показана выделенная маска

Величина магнитного потока вычислялась как

$$\Phi = \sum_P |B_r \Delta S|,$$

где B_r – радиальная компонента магнитного поля в пикселе, ΔS – элемент площади, соответствующий пикселю, P – пиксели, принадлежащие патчу. Для снижения влияния артефактов инструмента суммировались только значения B_r , по модулю превышающие $600 \text{ Мкс} \cdot \text{см}^{-1}$ (Norton et al., 2017). (Следует отметить, что в работе Norton et al. (2017) использовался порог в $575 \text{ Мкс} \cdot \text{см}^{-1}$.)

Интенсивность излучения вычислялась как

$$I = \sum_M I_{AIA},$$

где I_{AIA} – интенсивность излучения в пикселе карты AIA после пересчета в цилиндрические координаты, M – пиксели, принадлежащие маске.

Поскольку площадь, охватываемая маской, зависит в явном виде от площади пятен и вследствие этого может варьироваться, то уместно ввести плотность УФ-излучения (интенсивность на единицу площади):

$$i = \frac{I}{N_M},$$

где N_M – количество пикселей в маске. Таким образом, для каждой АО мы получаем три ряда величин, зависящих от времени: $\Phi(t)$, $I(t)$, $i(t)$.

Программа обработки была написана на языке программирования Python с применением библиотек Astropy (Astropy Collaboration et al., 2022), Sunpy (The SunPy Community et al., 2020), Numpy (Harris et al., 2020) и Scipy (Virtanen et al., 2020). Изображения сформированы с помощью библиотеки Matplotlib (Hunter, 2007).

3 Результаты

На рис. 3 показана диаграмма рассеяния между плотностью УФ-излучения i и полным беззнаковым магнитным потоком Φ в АО. Одна точка на графике соответствует одной паре карт УФ-излучения и магнитного поля. Оранжевым цветом выделены наблюдения, принадлежащие униполярным АО, синим – АО остальных классов. Из графика видно, что вид распределений заметно различается: в то время как для униполярных АО плотность УФ-излучения возрастает с ростом магнитного потока АО (коэффициент корреляции между логарифмами величин составляет 0.49), то для АО остальных классов эта величина практически не зависит от магнитного потока АО (коэффициент корреляции между логарифмами величин равен 0.11). При этом облако точек, соответствующих униполярным АО, располагается на графике ниже точек, принадлежащих АО остальных классов.

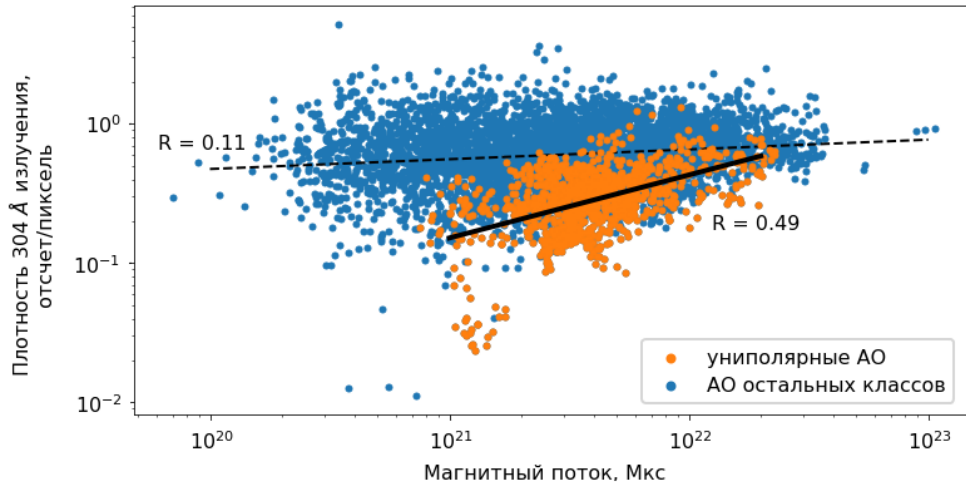


Рис. 3. Диаграмма рассеяния между плотностью УФ-излучения и полным беззнаковым магнитным потоком АО. Одна точка соответствует одной магнитограмме. Оранжевым цветом показаны униполярные АО, синим цветом – АО остальных классов. Аппроксимация между значениями для униполярных АО выделена сплошной черной линией, для АО остальных классов – пунктирной

Средняя плотность излучения для униполярных АО составляет 0.32 отсчета на пиксель, в то время как для АО остальных классов эта величина равна 0.68 отсчетов на пиксель. Среднеквадратические отклонения для множеств равны 0.16 и 0.35 отсчетов на пиксель соответственно. Подтверждает предположение о том, что эти величины имеют различные распределения, и критерий Колмогорова – Смирнова: статистика D составляет 0.58 и во много раз превышает критическое значение 0.05.

При выражении величины i в отсчетах на пиксель, а Φ – в Мкс, и подстановке численных значений аппроксимация между значениями плотности УФ-излучения и магнитного потока для униполярных АО имеет вид:

$$i = 2.53 \cdot 10^{-11} \Phi^{0.46}. \quad (1)$$

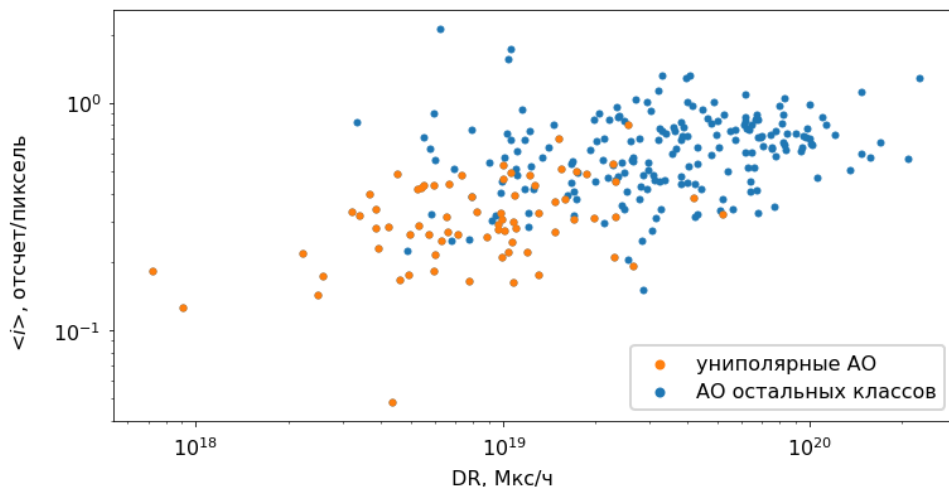


Рис. 4. Диаграмма рассеяния между средней плотностью УФ-излучения и скоростью затухания магнитного потока. Одна точка соответствует одной АО. Оранжевым цветом показаны униполярные АО, синим цветом – АО остальных классов

Для сопоставления плотности излучения со скоростью затухания магнитного потока была вычислена величина $\langle i \rangle$ – среднее по времени для ряда $i(t)$. Скорости затухания магнитного потока для различных АО были взяты из работы Plotnikov et al. (2023).

На рис. 4 изображена диаграмма рассеяния между $\langle i \rangle$ и скоростью затухания DR . Одна точка на графике соответствует одной АО. Так как выборки в данной работе и в Plotnikov et al. (2023) не совпадают, на график попали только 258 АО, изучавшиеся в обеих работах. Так же как и на рис. 3, униполярные АО обозначены оранжевым цветом, АО остальных классов – синим. Коэффициент корреляции между логарифмами величин составляет 0.54. Наличие корреляции не вызывает противоречия с предыдущим выводом о том, что плотность УФ-излучения в биполярных и мультиполярных АО слабо варьируется. В самом деле, если разбить эти выборки по классам, то обнаружится, что для униполярных АО коэффициент корреляции между логарифмами плотности УФ-излучения и скоростью затухания магнитного потока составит 0.41, а для АО остальных классов – 0.23. То есть для АО остальных классов плотность УФ-излучения над пятнами слабо варьируется также и с изменением скорости затухания магнитного потока (которая связана степенной зависимостью с максимальным магнитным потоком в АО). Наличие же корреляции для всей выборки вызвано в значительной доле тем фактом, что униполярные АО имеют в среднем более низкие как плотность УФ-излучения, так и скорость затухания.

4 Выводы и обсуждение

На основе выборки, состоящей из 617 АО различных магнитоморфологических классов, обнаружены следующие закономерности:

- Плотность УФ-излучения в канале 304 \AA над пятнами для униполярных АО в среднем ниже, чем для АО остальных классов. Средние значения плотности интенсивности для этих подмножеств составляют 0.32 ± 0.16 и 0.68 ± 0.35 отсчетов/пиксель соответственно.
- Для биполярных и мультиполярных АО плотность УФ-излучения над пятнами слабо зависит от полного беззнакового магнитного потока АО.
- Для униполярных АО зависимость между плотностью УФ-излучения над пятнами и полным беззнаковым магнитным потоком может быть выражена как $i = 2.53 \cdot 10^{-11} \Phi^{0.46}$, где величина i выражена в отсчетах на пиксель, а Φ нормирована на 1 Мкс, чтобы иметь безразмерную величину в основании степени.

Для 258 АО, изучавшихся также в Plotnikov et al. (2023), получено, что скорость затухания магнитного потока в АО коррелирует с плотностью УФ-излучения над пятнами.

Плотность УФ-излучения над пятнами в униполярных АО в среднем ниже, чем в АО остальных классов, и при этом зависит от магнитного потока АО. Ввиду этого, даже если соотношение из работы Schrijver (1987) (степенная зависимость между УФ-излучением, создаваемым АО и ее полным беззнаковым магнитным потоком) и будет сохраняться для униполярных АО, то коэффициенты соотношения будут отличаться от таковых для АО остальных классов. Это затрудняет использование данной зависимости для оценки магнитного потока униполярных АО, находящихся за лимбом. Однако вместо этого для оценки магнитного потока таких АО может быть использована зависимость из уравнения 1.

Причиной пониженной плотности УФ-излучения над пятнами в униполярных АО может являться более вертикальная ориентация магнитных силовых линий (по отношению к поверхности). При такой конфигурации в зоне формирования спектральной линии 304 \AA будет лежать меньший участок магнитного жгута, чем это было бы для биполярных АО (в них магнитные петли лежат ближе к поверхности Солнца и из-за этого имеют больший наклон по отношению к нормали). Вместе с наличием явной зависимости между плотностью УФ-излучения и скоростью затухания магнитного потока данный факт может пролить свет на причины медленной потери потока в некоторых униполярных АО.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Государственного задания № 122022400224-7. Автор выражает благодарность рецензенту, чьи конструктивные замечания помогли улучшить содержание статьи.

Литература

- Astropy Collaboration, Price-Whelan A.M., Lim P.L., et al., 2022. *Astrophys. J.*, vol. 935, no. 2, p. 167.
- Bobra M.G., Sun X., Hoeksema J.T., et al., 2014. *Solar. Phys.*, vol. 289, no. 9, pp. 3549–3578.
- Harris C.R., Millman K.J., van der Walt S.J., et al., 2020. *Nature*, vol. 585, no. 7825, pp. 357–362.
- Hunter J.D., 2007. *Comput. Sci. Eng.*, vol. 9, no. 3, pp. 90–95.
- Kaiser M.L., Kucera T.A., Davila J.M., et al., 2008. *Space Sci. Rev.*, vol. 136, no. 1–4, pp. 5–16.
- Müller D., Marsden R.G., St. Cyr O.C., Gilbert H.R., Solar Orbiter Team, 2013. *Solar. Phys.*, vol. 285, no. 1–2, pp. 25–70.
- Norton A.A., Jones E.H., Linton M.G., Leake J.E., 2017. *Astrophys. J.*, vol. 842, no. 1, p. 3.
- Pesnell W.D., Thompson B.J., Chamberlin P.C., 2012. *Solar. Phys.*, vol. 275, no. 1–2, pp. 3–15.
- Plotnikov A.A., Abramenko V.I., Kutsenko A.S., 2023. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 521, no. 2, pp. 2187–2195.
- Scherrer P.H., Schou J., Bush R.I., et al., 2012. *Solar. Phys.*, vol. 275, no. 1–2, pp. 207–227.
- Schrijver C.J., 1987. *Astron. Astrophys.*, vol. 180, no. 1–2, pp. 241–252.
- The SunPy Community, Barnes W.T., Bobra M.G., et al., 2020. *Astrophys. J.*, vol. 890, p. 68.
- Ugarte-Urra I., Upton L., Warren H.P., Hathaway D.H., 2015. *Astrophys. J.*, vol. 815, no. 2, p. 90.
- Virtanen P., Gommers R., Oliphant T.E., et al., 2020. *Nature Methods*, vol. 17, pp. 261–272.

Ultraviolet emission of unipolar active regions and a relation between its intensity and magnetic flux decay rate

A. Plotnikov

Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny 298409
plotnikov.andrey.alex@yandex.ru

Abstract. This study uses data on 617 active regions (ARs) acquired by the Solar Dynamics Observatory. Unipolar ARs exhibit a lower density of He II 304 Å ultraviolet (UV) emission above sunspots as compared to ARs of other types. Bipolar and multipolar ARs, regardless of their magnetic flux, show similar density of UV emission above the sunspots. In contrast, in unipolar ARs, the UV emission density increases with increasing magnetic flux. This relationship can be used to estimate magnetic flux values from the UV emission density maps. Additionally, the total unsigned magnetic flux decay rate is in moderate correlation with the UV emission above sunspots. This correlation may help to explain the phenomenon of slow-decaying unipolar ARs.

Key words: Sun, active regions, magnetic flux decay, transition layer