

## **СТАТИСТИЧЕСКОЕ СОПОСТАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ АНТИ-ХЕЙЛОВСКИХ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ И ПАРАМЕТРОВ ВСЕХ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ НА СОЛНЦЕ**

**Литвишко Д.В., Куценко А.С., Абраменко В.И.**

*Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Крым, Россия*

## **THE STATISTICAL COMPARISON OF THE ANTI-HALE ACTIVE REGIONS PARAMETERS WITH THE PARAMETERS OF ALL ACTIVE REGIONS ON THE SUN**

**Litvishko D.V., Kutsenko A.S., Abramenko V.I.**

*Crimean Astrophysical Observatory of RAS, Nauchny, Crimea, Russia*

*The active regions (ARs) violating the Hale polarity law (anti-Hale ARs) account for about 4% of the total numbers of ARs. This work presents the results of a comprehensive analysis of anti-Hale ARs, including studies of the rotation rate of anti-Hale ARs across the solar disk, the variation of tilt angles, the variation of the total anti-Hale regions area with cycle, and the location of the anti-Hale ARs along latitude. It was found that the rotation rates of anti-Hale and of all ARs are statistically indistinguishable, and therefore, assuming that the rotation rate of ARs can depend on the depth of generation of their magnetic flux bundles, we can conclude that there is no reason to assume the a specific formation depth for anti-Hale ARs. The tilt angle of these ARs is found to be about constant throughout the lifetime of an anti-Hale AR. This allows us to imply that they were formed with the orientation they appeared on the surface. The time-latitude diagram does not demonstrate any privilege location of the anti-Hale ARs (relative to all ARs). All the about results allows to make conclusion that anti-Hale ARs are generated with the same mechanism as the rest of ARs.*

**<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2024-213-216>**

### **Введение**

Согласно модели глобального динамо происходит циклическая трансформация полоидального глобального магнитного поля в тороидальное, из которого вновь формируется полоидальное магнитное поле. Дифференциальное вращение вытягивает и скручивает силовые линии полоидального поля, формируя магнитные жгуты в конвективной зоне, которые, при подъёме на поверхность, порождают активные области (АО).

Большинство АО Солнца подчиняются закону полярности Хейла, который гласит, что во время четного солнечного цикла, ведущее солнечное пятно биполярной АО имеет отрицательную полярность в северном полушарии, а в южном полушарии ситуация обратная, в следующем цикле полярность пятен меняется на противоположную. Модель глобального динамо успешно описывает формирование таких областей и многие другие аспекты солнечной активности, однако остаётся недостаточно изученным механизм формирования АО, нарушающих закон полярности Хейла, анти-

Хейловских АО, количество которых составляет около 4% среди всех АО в цикле.

На сегодняшний день нет однозначного мнения насчёт того, принадлежат ли анти-Хейловские и остальные АО к одной популяции или же существует отдельный динамо-механизм, который порождает анти-Хейловские АО.

В одном из исследований биполярных магнитных областей на Солнце Стенфло и Косовичев [1] подвергли сомнению гипотезу о существовании однородной когерентной системы тороидального потока, созданного в процессе динамо. Авторы обнаружили, что в одних и тех же широтных зонах одновременно присутствуют АО, как подчиняющиеся закону Хейла, так и анти-Хейловские АО (рис. 8 в работе [1]). Это может свидетельствовать о том, что в недрах Солнца сосуществуют противоположно ориентированные тороидальные потоки.

Команда следующих авторов [2] установила, что относительная распространённость анти-Хейловских и остальных АО в зависимости от широты очень схожа, средний тилт-угол увеличивается с увеличением широты, и ведущая полярность имеет тенденцию быть ближе к экватору как у анти-Хейловских, так и у остальных АО. Авторы [2] отмечают слабый максимум на гистограмме распределения тилт-углов магнитных диполей в том месте, где должны были бы локализоваться анти-Хейловские группы (рис. 8 в работе [2]). Однако несмотря на большую статистику выборка активных областей в [2] и расчет их параметров, для данного анализа проходили автоматически по определённому алгоритму, поэтому нет уверенности в том, что анти-Хейловские АО были идентифицированы верно.

Целью нашей работы было сопоставить анти-Хейловские и остальные АО по таким параметрам как скорость вращения по диску Солнца, распределение их площадей в процессе цикла, широтное распределение, а также вариации тилт-углов. Для того чтобы установить, являются ли они частью одной популяции.

### **Данные и методы**

В качестве списка анти-Хейловских АО был использован крымский каталог биполярных активных областей, нарушающих закон полярности Хейла за 1989–2018 годы [3]. Значения площадей и широт всех активных областей были взяты из среднемесячных данных USAF/NOAA (<http://solarcyclescience.com/activerregions.html>). А для расчёта тилт-угла и угловой скорости вращения были использованы магнитограммы полного диска продольного поля, полученные инструментом SDO/HMI. Сам метод расчёта угловой скорости вращения подробно описан в работе Куценко [4].

### **Результаты**

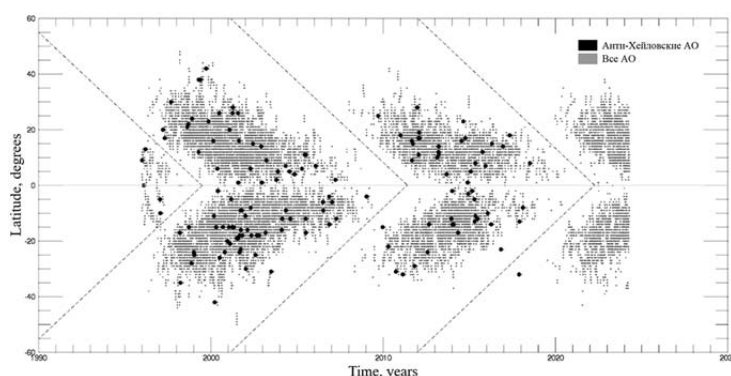
Ранее в работе [5] был проведён анализ скорости вращения по диску Солнца 44 биполярных АО, нарушающих закон полярности Хейла, которые наблюдались на видимом диске Солнца за период с 2010 по 2018 годы.

На рисунке 1 в [5] представлен график полученных скоростей вращения в зависимости от широты для анти-Хейловских АО, а также сопоставление его с графиком скоростей вращения по диску Солнца всех АО за это же время, что показано на рисунке 2 в [5].

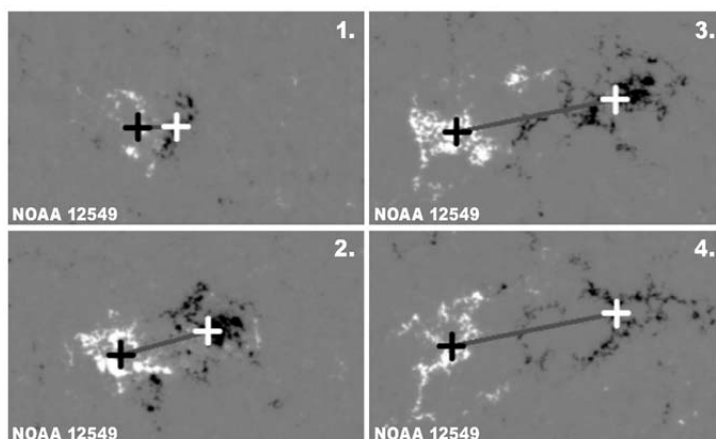
Проведение статистического теста  $\chi^2$  показало, что данные распределения статистически неразличимы, поэтому, можно сказать, что анти-Хейловские и остальные АО принадлежат одной и той же выборке, а следовательно, предполагая, что скорость вращения может зависеть от глубины формирования АО, можно сделать вывод о том, что нет различий в глубинах генерации магнитных жгутов анти-Хейловских и остальных АО.

Следующим шагом было сопоставление распределения суммарных площадей по годам 143 выбранных из каталога анти-Хейловских АО 23-го и 24-го циклов с распределением суммарных площадей по годам всех АО этих же циклов [6]. По рисунку 2 в [6] можно заметить, что распределения подобны. Минимум достигается анти-Хейловскими и всеми АО одновременно. Полученная умеренная положительная корреляция проведённого корреляционного теста также показала взаимосвязь между распределениями.

Далее было проведено сравнение широтного распределения тех же анти-Хейловских и остальных АО, полученный график продемонстрирован на рисунке 1. Из данного графика видно, что широтное распределение анти-Хейловских АО аналогично остальных АО.



**Рис. 1.**

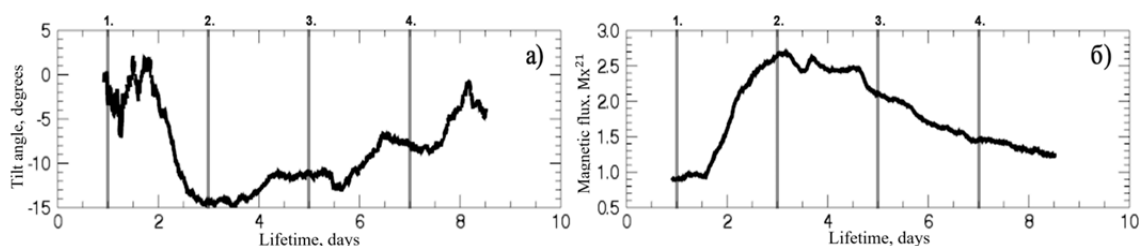


**Рис. 2.**

В дополнение был проведен анализ тилт-угла анти-Хейловских АО за 2010–2024 годы. По данным SDO/HMI было выбрано 23 анти-Хейловских АО, представляющих бипольные области. На рисунке 2 представлен пример эволюции анти-Хейловской АО 12549, которая наблюдалась в южном полушарии в мае 2016 года.

Белым крестом обозначен средневзвешенный по потоку центр положительной полярности, черным – средневзвешенный по потоку центр отрицательной полярности.

На рисунке 3а представлен график изменения тилт-угла этой АО. На рисунке 3б – изменение магнитного потока.



**Рис. 3.**

Предполагая, что анти-Хейловские АО – это обычные активные области, которые по каким-либо причинам поменяли свою ориентацию во время всплытия, мы должны увидеть систематическое вращение анти-Хейловских АО во время их эволюции с тем, чтобы восстановить их нормальную ориентацию. Однако в случае этой АО и остальных 22 мы этого не наблюдаем. Вращение наблюдается в период роста АО и составляет около пары десятков градусов, как и у многих других АО. Это говорит о том, что их тилт-угол сохраняется в течение всей жизни, и эта анти-Хейловская АО, как и другие исследованные нами, была сформирована с той же ориентацией, с которой она появилась на поверхности.

### **Выводы**

Проведенное статистическое сопоставление анти-Хейловских и остальных АО по параметрам скорости вращения по диску Солнца, распределения их суммарных площадей по годам в течение цикла, широтного распределения и вариациям тилт-углов не выявил статистически значимых различий, которые могли бы свидетельствовать об их принадлежности к разным популяциям.

### **Литература**

1. Stenflo J.O., Kosovichev, A.G. // *Astrophys. J.*, 2012, 745, 129.
2. Munoz-Jaramillo A., et al. // *Astrophys. J.*, 2021, 920, 31.
3. Zhukova A., et al. // *Sol. Phys.*, 2020, 295, 165.
4. Kutsenko A.S. // *MNRAS*, 2021, 500, 4, 5159.
5. Litvishko D.V., et al. // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2023, 63, 1111.
6. Литвишко Д.В., Куценко А.С., Абраменко В.И. // *ССЗФ-2023. Труды.* – СПб, 2023, 207-210.