РАЗРЕШЕНИЕ НЕОДНОЗНАЧНОСТЕЙ ПРИ ИДЕНТИФИКАЦИИ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ С НАРУШЕНИЕМ ЗАКОНА ПОЛЯРНОСТЕЙ ХЕЙЛА

**Жукова А.В.¹, Хлыстова А.И.², Абраменко В.И.¹,
Москвина А.М.¹, Соколов Д.Д.^{3,4,5}**

¹*Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Крым, Россия*

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

³*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

⁴*Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия*

⁵*ИЗМИРАН им. Н.В. Пушкова, Троицк, Москва, Россия*

RESOLVING OF AMBIGUITIES IN THE IDENTIFICATION OF ACTIVE REGIONS VIOLATING THE HALE POLARITY LAW

**Zhukova A.V.¹, Khlystova A.I.², Abramenko V.I.¹,
Moskvina A.M.¹, Sokoloff D.D.^{3,4,5}**

¹*Crimean Astrophysical Observatory of RAS, Nauchny, Crimea, Russia*

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

³*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

⁴*Moscow Center for Fundamental and Applied Mathematics, Moscow, Russia*

⁵*IZMIRAN, Troitsk, Moscow, Russia*

We used SOHO/MDI(EIT), SDO/HMI(AIA), and the Debrecen Photoheliographic data (DPD); USAF/NOAA Solar Region Summary (SRS) to study 8703 active regions (ARs) from 1989 January 1 to 2019 December 31. Difficulties in an identification of ARs violating the Hale's Polarity Law (anti-Hale ARs) and main reasons for possible mistakes are discussed. The proposed criteria to define a sunspot group as anti-Hale AR are consistent with classical ideas by G.E. Hale and magnetic cycle models. According to these criteria, anti-Hale region is a bipolar AR (with presence at least pores in both polarities) having a leading spot of reverse polarity; magnetic connections between the polarities are stable (visible at least in one of the EUV images). Additional conditions for some uncertain types of ARs are also proposed. 277 sunspot groups meeting the proposed criteria were identified as anti-Hale ARs. A percentage of anti-Hale ARs is found as $\approx 3.0\%$ (relative to the number of all ARs from the USAF/NOAA SRS) and slightly higher, $\approx 3.9\%$ (relative to the DPD data for a period from 1989 January 1 to 2018 June 19). A catalog of anti-Hale ARs is available for period 1989–2018: <https://sun.crao.ru/databases/catalog-anti-hale>.

DOI: 10.31725/0552-5829-2020-109-112

В соответствии с законом полярностей Хейла биполярные активные области (АО) имеют противоположную полярность лидирующих пятен в северном и южном полушарии; полярность изменяется от цикла к циклу [1]. Появление АО, нарушающих это правило, не укладывается в рамки классических моделей магнитного цикла [2, 3] и не может быть полностью

объяснено действием глобального динамо среднего поля. Появление АО с обратной полярностью можно связать с флуктуациями магнитного поля и с действием флуктуационного (мелкомасштабного) динамо на магнитные трубки АО [4, 5]. Исследования анти-Хейловских АО могут прояснить роль флуктуационного динамо в их конкурентном взаимодействии с глобальным динамо, выявить особенности процесса восстановления полярного поля, причины деформации магнитных трубок АО.

Отсутствие единого источника информации об анти-Хейловских АО, неполнота данных имеющихся каталогов, неоднородность данных в индивидуальных базах разных исследователей затрудняет проведение научных исследований. Например, существует расхождение в оценках относительного количества анти-Хейловских АО. Большинство опубликованных оценок укладывается в диапазон от нескольких единиц до $\approx 8\%$ [6–16], хотя некоторые авторы приводят 16–21% [17].

Мы изучили 8703 АО, появлявшиеся на диске с января 1989 г. по декабрь 2019 г. Для визуального просмотра нами использовались ежедневные данные полного диска Солнца инструментов SOHO/MDI и SDO/HMI (магнитограммы и continuum), инструментов SOHO/EIT и SDO/AIA (в линиях УФ). Использовались также фотогелиографические данные DPD (<http://fenyi.solarobs.csfk.mta.hu/DPD/index.html>). Результаты просмотра АО сопоставлялись с данными каталогов Mount Wilson (ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SUNSPOT_REGIONS/Mt_Wilson) и КрАО (<https://sun.crao.ru/databases/catalog-mm-c-ars>). Использовалась также база данных USAF/NOAA SRS (<http://solarcyclescience.com>).

Причины, по которым группы солнечных пятен могут быть ошибочно идентифицированы как анти-Хейловские АО, условно разделены на три группы. К первой группе относятся причины общего характера, связанные с местоположением и процессом всплытия АО. Во-первых, неправильное распределение АО между циклами. В минимумах цикла, наряду с низкоширотными АО старого цикла, на солнечном диске появляются также высокоширотные АО нового цикла. Распределить АО между циклами позволяет методика, предложенная в работе [15]. Во-вторых, неоднозначности, связанные со временем установления тилта (отклонения оси биполя от экватора), которое составляет от одного до нескольких дней с момента всплытия АО [18]. Это создает неоднозначность в определении лидирующего пятна. Поэтому малые короткоживущие (менее трех дней) АО с нестабильным тилтом (вращение; тилт $\approx 90^\circ$) и АО, всплывающие непосредственно возле западного лимба, исключались. В-третьих, обращение полярности пятен АО вблизи лимба из-за эффекта проекции (такие также АО исключались). В-четвертых, неоднозначность представляли АО, расположенные вблизи экватора. АО относились нами к тому полушарию, в котором находились вместе центр тяжести АО по площади и средняя точка между основными пятнами разных полярностей.

Вторая группа объединяет причины, связанные с особенностями эволюции АО. Во-первых, случаи, когда новый биполярный магнитный поток всплывает возле старого пятна. Если такой биполь наблюдался более трех дней и не имел собственного номера NOAA, мы выделяли его из общей группы пятен. Во-вторых, биполярные АО, у которых обратная полярность была зарегистрирована лишь часть времени при прохождении по диску (ориентация биполя могла изменяться вследствие вращения оси, всплытия нового потока «поверх» старых пятен и т.п.). Такие АО рассматривались только в «анти-Хейловский» период их существования.

Третью группу составляют причины, связанные с топологией пятен АО и высокой вероятностью неправильной их идентификации при помощи автоматических алгоритмов обработки магнитограмм и зарисовок. Во-первых, неправильное определение границ АО. В максимумах цикла всплывающие близкорасположенные АО образуют цепочки и блоки. Комбинация хвостового пятна АО с лидирующим пятном последующей (всплывающей восточнее) группы может быть ошибочно принята за анти-Хейловскую АО. Во-вторых, сложность представляют регулярные (подчиняющиеся закону Хейла) АО на поздних стадиях разрушения (отсутствие пор или слабые поры в хвостовой части). Комбинация долгоживущего лидирующего пятна и новых пор противоположной полярности западнее может быть ошибочно принята за биполь с обратной полярностью. Такая ситуация характерна для разрушающихся АО сложной магнитной конфигурации. Поры перед старыми лидерами также часто появляются из-за процессов, происходящих при разрушении пятен на границах моат-ячеек [19]. Другой пример – АО с порами противоположной полярности, рассеянными вокруг долгоживущего лидирующего пятна, когда центр тяжести по потоку (площади) рассеянных пор оказывается западнее старого лидера. В-третьих, мультиполярные АО, у которых равноценные пятна обеих полярностей не формируют выраженной биполярной структуры. Центр тяжести по потоку (площади) пятен с условно «неправильной» полярностью в таких АО также может быть смещен к западу. Все типы АО, относящиеся к третьей группе неоднозначностей, при составлении каталога не учитывались.

Особый случай представляют собой « δ -структуры» – биполярные АО, у которых близкорасположенные ядра находятся в общей полутени [20]. Нами учитывались не только отдельные « δ -структуры» с обратной полярностью, но и некоторые « δ -структуры» в составе комплексов активности. Такая группа выделялась и учитывалась, если представляла самую выраженную деталь комплекса активности и не имела выраженных связей с остальными магнитными центрами комплекса.

По результатам анализа неоднозначностей предложены два основных критерия, позволяющие идентифицировать группу пятен как анти-Хейловскую АО. Они опираются на классические идеи, изложенные в ра-

боте [1], и на модели магнитного цикла [2, 3]. Согласно этим критериям анти-Хейловская АО представляет собой биполь обратной полярности (с присутствием как минимум пор в обеих полярностях); магнитные связи между полярностями должны быть стабильными и наблюдаться хотя бы в одной из линий УФ (в случаях, когда данные УФ доступны).

Предложенным критериям и описанным выше условиям для некоторых типов неоднозначных АО удовлетворяют 277 исследованных групп солнечных пятен; они включены в каталог анти-Хейловских АО. Все АО с описанными выше неоднозначностями имеют в каталоге специальные отметки. Анти-Хейловские АО составили $\approx 3.0\%$ от АО, наблюдавшихся по данным USAF/NOAA SRS в период нашего исследования. Процентаж относительно данных DPD (за период с 1 января 1989 г. по 19 июня 2018 г.) несколько выше: $\approx 3.9\%$. Полученные значения близки к ранним оценкам, полученным авторами, проверявшими данные по каждой АО индивидуально [6, 7].

Авторы благодарны РФФИ: Д.С. и А.Х. – по гранту 18-02-00085; А.Х. – по гранту 19-52-45002. Работа А.Х. выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16. Работа А.Ж и В.А. частично выполнена в рамках НИР 0831-2019-0006.

Литература

1. Babcock, H.W. // *Astrophys. J.*, 1961, 133, 572.
2. Hale, G.E., Ellerman, F., Nicholson, S.B., Joy, A.H. // *Astrophys. J.*, 1919, 49, 153.
3. Parker, E.N. // *Astrophys. J.*, 1955, 122, 293.
4. Sokoloff, D., Khlystova, A., Abramenko, V. // *MNRAS*, 2015, 451, 1522.
5. Abramenko, V.I., Zhukova, A.V., Kutsenko, A.S. // *Geomagn. and Aeron.*, 2018, 58, 1159.
6. Hale, G.E., Nicholson, S.B. // *Astrophys. J.*, 1925, 62, 270.
7. Richardson, R.S. // *Astrophys. J.*, 1948, 107.
8. Smith, S.F., Howard, R. // *proc. IAU Symp.*, 1968, 35, 33.
9. Vitinsky, Y.I. // *Byull. Solnechnye Dannye Akad. Nauk SSSR*, 1986, 9, 86.
10. Wang, Y.-M., Sheeley, J.N.R. // *Solar Phys.* 1989, 124, 81.
11. Khlystova, A.I., Sokoloff, D.D. // *Astronomy Reports*, 2009, 53, 281.
12. Sokoloff, D., Khlystova, A.I. // *Astron. Nachr.*, 2010, 331, 82.
13. Stenflo, J.O., Kosovichev, A.G. // *Astrophys. J.*, 2012, 745, 129.
14. Li, J., Ulrich, R.K. // *Astrophys. J.*, 2012, 758, 115.
15. McClintock, B.H., Norton, A.A., Li, J. // *Astrophys. J.*, 2014, 797, 130.
16. Li, J. // *Astrophys. J.*, 2018, 867, 89.
17. Тлатова К.А., Тлатов А.Г. / Труды конф. «ССЗФ–2019», 2019, 395.
18. van Driel-Gesztelyi, L., Green, L.M. // *Liv. Rev. Solar Phys.*, 2015, 12, 1.
19. Ryutova, M. // *Astrophys. Space Sci. Lib.*, 2018, 455.
20. Künzel, H. // *Astron. Nachr.*, 1965, 288, 177.