ИССЛЕДОВАНИЕ АНТИ-ХЕЙЛОВСКИХ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ В СОЛНЕЧНОМ МИНИМУМЕ ПРИ ПОМОЩИ СИНТЕТИЧЕСКОГО ЦИКЛА

Жукова А.В.¹, Хлыстова А.И.^{1,2}, Абраменко В.И.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*

STUDYING OF ANTI-HALE ACTIVE REGIONS IN THE SOLAR MINIMUM USING A SYNTHETIC CYCLE

Zhukova A.V.¹, Khlystova A.I.^{1,2}, Abramenko V.I.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 the catalog of anti-Hale ARs of the Crimean Astrophysical Observatory (CrAO) for period 1989–2020 (<https://sun.crao.ru/databases/catalog-anti-hale>), the Mount Wilson Magnetic Observations, SOHO/MDI(EIT) and SDO/HMI(AIA) data, the Debrecen Photoheliographic Data (DPD), and the USAF/NOAA Solar Region Summary (SRS) to study active regions (ARs) violating the Hale's polarity law in solar cycles 16–18 and 23, 24. We compiled a synthetic cycle (14838 ARs, including 367 anti-Hale groups) to provide sufficient significance of statistical study. Two synthetic cycles were combined with different overlap intervals to simulate a solar minimum. When the overlap interval was 1–2 years, the peaks in time variations of anti-Hale ARs percentage were observed, which is consistent with previous studies on real cycles. The phenomenon might be related to the manifestation of additional mechanisms for generating solar magnetic fields (for example fluctuation dynamo) during periods of low activity of the global dynamo.

DOI: 10.31725/0552-5829-2021-123-126

Модели магнитного цикла объясняют явление солнечной активности, но не в полной мере. Согласно современным представлениям, базирующимся на классических подходах [1, 2], генерация солнечных магнитных полей осуществляется за счет взаимного преобразования полоидального и тороидального магнитных полей, происходящего внутри Солнца с 11-летней периодичностью. Направление тороидального поля, характерное для данного цикла, определяет характеристики появляющихся на солнечной поверхности активных областей (АО).

В соответствии с законом полярностей Хейла [3] биполярные АО в северном и южном полушарии имеют противоположную полярность ли-

дирующих пятен; полярность изменяется от цикла к циклу. Появление АО, нарушающих как этот, так и другие эмпирические законы, установленные для групп солнечных пятен (например, закон Джоя), не укладывается в рамки моделей магнитного цикла и не может быть полностью объяснено действием глобального динамо среднего поля [4].

Исследование АО с нарушением закона Хейла затруднено, поскольку малое число таких групп не обеспечивает достаточную достоверность статистических исследований. Авторы, исследовавшие анти-Хейловские группы пятен индивидуально, приводят данные об их относительном содержании $\approx 4\%$ (см. ссылки в работе [5]); применение некоторых автоматических алгоритмов выделения АО показывает такие же результаты [6]. В качестве возможного решения статистических трудностей можно предложить объединение данных относительно анти-Хейловских АО за несколько циклов.

В качестве источников данных о группах солнечных пятен с нарушением закона полярностей Хейла нами использовались: каталог КрАО [5] (<https://sun.crao.ru/databases/catalog-mmcs-ars>), содержащий информацию за 1989–2020 гг.; рабочая база данных А.Х., составленная по сводкам Mount Wilson Magnetic Observations, которые были опубликованы в 1920–1958 гг. в журнале PASP (<https://iopscience.iop.org/journal/1538-3873>). Для визуального просмотра АО 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>) и база данных АО USAF/NOAA SRS (<http://solarcyclescience.com>).

Для корректного выделения АО каждого индивидуального цикла мы пользовались методикой проведения границ между циклами, предложенной в работе [7]. Соединение данных нескольких циклов является непростой задачей, поскольку циклы имеют разную длительность и амплитуду. Тем не менее, подобие циклов позволяет проводить с ними линейные преобразования [8]. Для лучшей подгонки мы провели такое преобразование не только по времени, как это делалось ранее, но и по широте. За нуль-пункт был принят момент, когда АО каждого из циклов появлялись регулярно (хотя бы 2–3 раза в месяц). Полученный синтетический цикл занимает по времени около 13 лет, т.к. его начальный и конечный периоды соответствуют периоду наложения реальных циклов (когда низкоширотные АО старого цикла и высокоширотные АО нового цикла появляются на диске одновременно). Для моделирования солнечного минимума мы состыковывали два синтетических цикла с разными интервалами наложения: один, два и три года.

Анализ временных изменений анти-Хейловских АО синтетического цикла показал следующее. В целом группы с обратной полярностью сле-

дуют циклу, что свидетельствует об их неразрывной связи с глобальным динамо и согласуется с выводами работы [9]. Для относительного числа анти-Хейловских АО при интервалах наложения один и два года (что соответствует наложению реальных циклов) в минимуме цикла наблюдаются пики. Полученный результат также согласуется с предыдущими исследованиями: рост доли анти-Хейловских АО в солнечном минимуме был обнаружен ранее для нескольких последовательностей циклов в работах [7, 10]. Однако интерпретации предлагались разные. В работе [7] это явление было связано с возможной сдвижкой магнитного экватора относительно гелиографического. В работе [10] была обсуждена возможная связь обнаруженного явления с флуктуациями магнитного поля и с проявлением мелкомасштабного динамо в минимуме цикла, когда воздействие глобального динамо наименее выражено.

Исследование широтно-временного распределения числа и доли анти-Хейловских АО в синтетическом цикле обнаружило свидетельства смещения магнитного экватора относительно гелиографического: вблизи экватора доля групп с обратной полярностью больше. Следует отметить, что предположения о несовпадении линий экваторов высказывались и ранее [11]. Более того, линия магнитного экватора может иметь сложную форму, как показали исследования, представленные в работе [12], и появление анти-Хейловских АО на разных широтах подтверждает это.

Тем не менее, не все результаты наблюдений можно объяснить в рамках объяснений, связанных с особенностями линии магнитного экватора. Увеличение доли анти-Хейловских групп пятен на разных широтах именно вблизи солнечного минимума, наблюдающееся на бабтерфляй-диаграмме, может свидетельствовать о наличии дополнительного механизма генерации солнечных магнитных полей и поддерживает интерпретацию, представленную ранее в работе [10]. Вероятно, роль флуктуационного динамо в их конкурентном взаимодействии с глобальным динамо возрастает в минимуме цикла, что и приводит к увеличению доли нарушителей в этот период.

Предположение о растущем вмешательстве флуктуационного динамо в действие глобального динамо, проявляющемся в солнечном минимуме, поддерживает еще один наблюдательный факт. Как это следует и из широтно-временного распределения, полученного нами для синтетического цикла, и из тщательного анализа данных исходных циклов, практически все анти-Хейловские АО относятся к окончанию цикла, тогда как в начале цикла такие группы пятен практически не появляются на диске. Это может быть связано с тем, что сильное регулярное тороидальное поле нового цикла вытесняет на поверхность и ускоряет всплытие тороидального поля старого цикла, слабеющего и теряющего регулярность в ходе цикла. Разрозненные линии старого поля в большей степени подвержены влиянию

флуктуаций, что может приводить к образованию большего относительно числа АО с нарушением закона полярностей.

Классификация АО выполнена А.Ж. и А.Х. при поддержке РФФИ (проект 18-12-00131). В.А. благодарит Минобрнауки РФ (НИР 0831-2019-0006). Работа А.Х. с материалами RASP выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России. Д.С. благодарен фонду Базис за поддержку в рамках гранта 21-1-1-4-1.

Литература

1. *Parker, E.N.* // *Astrophys. J.*, 1955, 122, 293.
2. *Babcock, H.W.* // *Astrophys. J.*, 1961, 133, 572.
3. *Hale, G.E., Ellerman, F., Nicholson, S.B., Joy, A.H.* // *Astrophys. J.*, 1919, 49, 153.
4. *Krause, F., Rädler, K.-H.* *Mean-Field Magnetohydrodynamics and Dynamo Theory.* – Pergamon, Oxford. 1980.
5. *Zhukova, A., Khlystova, A., Abramenko, V., Sokoloff, D.* // *Solar Phys.*, 2020, 295, 165.
6. *Stenflo, J.O., Kosovichev, A.G.* // *Astrophys. J.*, 2012, 745, 129.
7. *McClintock, B.H., Norton, A.A., Li, J.* // *Astrophys. J.*, 2014, 797, 130.
8. *Hathaway, D.H.* // *Living Rev. Solar Phys.*, 2015, 12, 4.
9. *Abramenko, V.I., Zhukova, A.V., Kutsenko, A.S.* // *Geomagn. and Aeron.*, 2018, 58, 1159.
10. *Sokoloff, D., Khlystova, A., Abramenko, V.* // *MNRAS*, 2015, 451, 1522.
11. *Zolotova, N.V., Ponyavin, D.I., Marwan, N., and Kurths, J.* // *A&A*, 2009, 503, 197.
12. *Obridko, V.N., Chertoprud, V.E., Ivanov, E.V.* // *Solar Phys.*, 2011, 272, 59.