

УДК 523.98

ВОЗМОЖНОСТЬ ДИАГНОСТИКИ НАЧАЛА 25-ГО СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА НА ОСНОВЕ ЕГО ПРЕДВЕСТНИКОВ НА СРЕДНИХ ГЕЛИОШИРОТАХ

© 2020 г. А. А. Головко*

*Институт солнечно-земной физики СО РАН (ИСЗФ СО РАН),
г. Иркутск, Россия*

**e-mail: golovko@iszf.irk.ru*

Поступила в редакцию 07.03.2020 г.

После доработки 07.04.2020 г.

Принята к публикации 21.05.2020 г.

Исследована возможность диагностики начала солнечного цикла на основании обнаружения мелкомасштабных магнитных образований — магнитных узлов эфемерных активных областей в зоне средних гелиоширот от 40° до 60° . Магнитные узлы выявлялись на стадии их возникновения методом мультифрактальной сегментации, использованном ранее для фиксации новых магнитных потоков активных областей в зоне низких гелиоширот. Проведены статистические оценки числа магнитных узлов, фиксируемых таким методом, по данным магнитографа SOLIS NSO для 24-го цикла солнечной активности, а также для начала 25-го цикла активности. Обнаружен предвестник 24-го солнечного цикла в виде всплеска числа магнитных узлов в 2007–2008 гг., значительно превышающего его фоновое значение, характерное для периода 2011–2015 гг. Спустя два года началось появление первых активных областей на широтах $30^\circ \pm 10^\circ$. Аналогичная последовательность фаз начала цикла обнаружена для 25-го цикла. В отличие от ситуации 24-го цикла, массовое появление высокоширотных активных областей 25-го цикла произошло позже всплеска числа узлов эфемерных активных областей примерно на 2.5 года.

DOI: 10.31857/S001679402006005X

1. ВВЕДЕНИЕ

Прогноз хода 11-летнего цикла солнечной активности имеет значение для планирования человеческой деятельности в силу того, что слишком многие процессы на Земле, например изменения климата [Maquyama et al., 2017], показывают корреляцию с уровнем солнечной активности. Точное знание и идентификация предвестников будущего цикла активности переводит задачу прогноза в плоскость ранней диагностики цикла. Это делает информацию о предвестниках цикла и времени его начала значимой и актуальной [Ишков, 2017] для многих ее потребителей.

Концепция предвестников или ранних проявлений солнечного цикла в высоких гелиоширотах сформировалась в работах [Sheeley, 1964; Чистяков, 1986; Wilson et al., 1988; Makarov and Makarova, 1996; LaBonte and Howard, 1982; Gelfreikh et al., 2002; Platov, 2009]. Цикл зарождается в полярных зонах широт, где в фоновом магнитном поле возникают полярные факелы и яркие точки, наблюдаемые в линии К Ca II. Это происходит в течение предыдущего цикла активности. Торсионные колебания [LaBonte and Howard, 1982] в работе [Wil-

son et al., 1988] были ассоциированы с эфемерными активными областями (АО), появляющимися на фазе спада текущего солнечного цикла, но имеющими ориентацию магнитных полярностей нового солнечного цикла.

В настоящей работе для изучения изменений магнитного поля на гелиоширотах выше 40° , применен адаптированный к анализу солнечных магнитограмм в работах [Головко и Салахутдинова, 2012, 2015] известный метод мультифрактальной сегментации. Он позволяет картографировать новые всплывающие магнитные потоки по их скейлинговым свойствам, определяемым на основании магнитограмм продольного магнитного поля или полного вектора. В указанных работах главное внимание было уделено изменениям магнитного поля в экваториальных ($\varphi \leq 30^\circ$) зонах солнечной фотосферы. В данной работе те же сегментированные изображения использованы для анализа распределений малых ($\approx 3''$) магнитных узлов на средних и в высоких широтах. Задачей данной работы является исследование возможности диагностики начала солнечного цикла на основании обнаружения мелкомасштабных магнитных образований в зоне средних гелиоширот.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

2.1. Наблюдения

В работе использовались магнитограммы векторного спектромагнитографа SOLIS за период с августа 2003 г. по октябрь 2017 г. и спектромагнитографа NASA/NSO за период с августа 1995 г. по август 2003 г. из общедоступной базы данных Национальной солнечной обсерватории США.

Ежедневные магнитограммы поля полного диска Солнца записываются с помощью векторного спектромагнитографа VSM SOLIS [Henney et al., 2006]. Диаметр пикселя составляет 1.14" до января 2010 г. и 1" после этой даты. Напряженность магнитного поля рассчитывается методом инверсии контура линии с помощью программы, разработанной группой сотрудников High Altitude Observatory для прибора Stokes Polarimeter [Skumanich and Lites, 1987]. Для векторной спектрополяриметрии использовался спектральный диапазон в линии Fe I 630.15–630.25 нм, и запись полного диска Солнца занимает 15 мин.

Спектромагнитограф NASA/NSO [Jones et al., 1992] использовался для получения магнитограмм продольного поля в спектральной линии Fe I 868.8 нм с разрешением 1" до августа 2003 г.

2.2. Методика обработки данных

Одним из принципиально важных свойств распределения магнитного поля по поверхности Солнца является обнаруженное в работе [Lawrence et al., 1993] свойство мультифрактальности, позволяющее представить поле как совокупность самоподобных структур. Важным этапом развития этого подхода стали результаты изучения изменений мультифрактальной структуры активных областей в ходе их эволюции [Абраменко, 2002; Abramenko et al., 2002]. Проявлением такой структуры является наблюдаемое преобладание степенных распределений плотности магнитного потока по амплитуде и пространственному масштабу. Это, в частности, выражается в установленной в работе [Головко, 1998] степенной зависимости между магнитным потоком солнечного образования (АО, ЭАО) и временем его жизни. Такая же зависимость недавно обнаружена для пятен на звездах солнечного типа [Namekata et al., 2019].

При обработке магнитограмм, мы использовали вариант мультифрактального анализа, основанный на использовании емкостей Шоке и предложенный в работах [Levi-Vehel and Vojak, 1998; Макаренко и Князева, 2009]. Видеомагнитограммы Солнца представлены на сайте [NSO/NISP: SOLIS Full-Disk Images] в форме FITS-файла сигнала магнитографа в цифровом виде, с одинаковым шагом растровой развертки по координатам

ограниченной области, в картинной плоскости. При подготовке магнитограмм к анализу они переводились в неотрицательную область значений сигнала путем сложения с константой, равной модулю минимального значения на карте. Полученная карта аналогична карте интенсивностей, т.е. изображению, и к ней применим известный подход анализа, сформулированный в работе [Макаренко и Князева, 2009].

Метод мультифрактальной сегментации, использованный в данной работе, может быть описан кратко следующим образом. В отличие от монофракталов, характеризующихся единственным числом – фрактальной размерностью, мультифрактал является ансамблем фракталов и характеризуется совокупностью фрактальных размерностей или мультифрактальным спектром. Предположим, что задано распределение некоторой меры m на координатной плоскости (x, y) , например изображение в долях уровня серого или карта. Мере в окрестности текущей точки (x_i, y_i) можно аппроксимировать степенным законом $m(\epsilon) \sim \epsilon^\alpha$, где $\alpha = \alpha(x_i, y_i)$ является экспонентой сингулярности, или Гельдеровской экспонентой. Каждому α , заданному в пределах $(\alpha_k, \alpha_{k+\delta})$ можно сопоставить носитель меры – множество точек или пикселей, в малой окрестности которых мера имеет показатель сингулярности из указанного диапазона. Для этого множества можно определить его фрактальную размерность f . Она оценивается путем покрытия фигуры этого множества набором боксов различного размера. Функцию $f(\alpha_k)$ называют хаусдорфовой размерностью данного множества точек. При $\delta \rightarrow \delta_{\min}$ получаем мультифрактальный спектр $f(\alpha)$. Далее можно рассчитать сегментированные изображения, соответствующие определенным интервалам фрактальной размерности f . Впервые применимость мультифрактального подхода к описанию распределения фотосферного магнитного поля показана в работе [Lawrence et al., 1993], обоснована на большом наблюдательном материале в работах [Абраменко, 2002; Abramenko et al., 2002]. В работе [Головко и Салахутдинова, 2012] было предложено использовать мультифрактальные сегментированные изображения в интервале f в пределах $(0; 0.4)$ для выявления областей нового магнитного потока. Расчеты проводились с помощью пакета программ [FRACLAB: A fractal analysis toolbox for signal and image processing]. На рисунках 1а, 1б, 1в представлена исходная магнитограмма SOLIS, полученная с использованием этого спектра сегментированное изображение и мультифрактальный спектр. На рисунках 1г, 1д, 1е приведено то же для большой активной области № 10930 по NOAA для той же даты. Видно, что в основном магнитная активность и новые магнитные потоки расположены в экваториальной области.

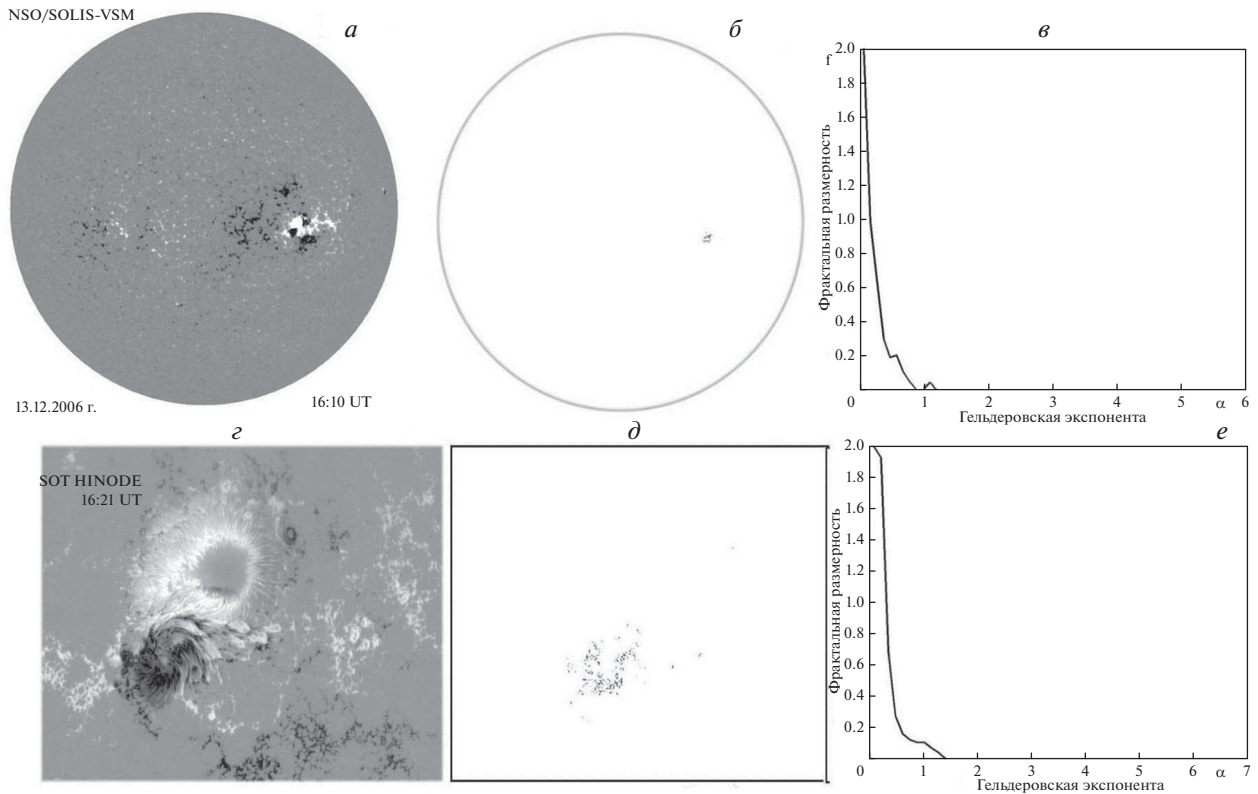


Рис. 1. Магнитограмма SOLIS за 13 декабря 2006 г. (а), ее сегментированное изображение (б) и мультифрактальный спектр (е). Затемненные участки на сегментированном изображении выявляют новый магнитный поток в АО 10930. Магнитограмма SOT Hinode АО 10930 (з), ее сегментированное изображение (д) и мультифрактальный спектр (е) демонстрируют новый магнитный поток с большим пространственным разрешением (0.3").

Более тщательное обследование всей совокупности рассчитанных сегментированных изображений привело к заключению, что и в области высоких гелиоширот, т.е. более 40° , появляются малые (размера $3''$ – $4''$) элементы, диагностируемые при нашей обработке как новые магнитные потоки, а в отдельные годы их наблюдается много. На сегментированных изображениях они занимают обычно 1 пиксель. Это подтолкнуло нас к рассмотрению статистики таких элементов, которые были названы магнитными узлами в работах [Beckers and Schroter, 1967; Grigoryev, 1969]. Они могут быть униполярными или составлять биполярные пары – так называемые эфемерные активные области, описанные в работе [Harvey and Martin, 1973].

2.3. Статистика магнитных узлов

В процессе обработки ежедневных магнитограмм полного диска Солнца на каждое сегментированное изображение накладывалась координатная сетка Стонихёрста и в зонах широт от 40° до 60° отмечались магнитные узлы, имеющие свойства нового магнитного потока (как на рис. 1

в экваториальной зоне). То же было сделано отдельно для полярной зоны широт выше 60° . Определялись гелиографические координаты и полярность магнитного поля узлов. На рисунке 2в показаны упомянутые зоны. Нахождение каждого такого узла отмечалось как событие в данном месте. Повторное событие на следующий день в том же положении по кэррингтоновским координатам, что отмечалось весьма редко, не включалось в статистику. Также не включалось обнаружение развитых АО на широте выше 40° в сентябре 1997 г. и в сентябре 2009 г.

Идентификация обнаруживаемых нашим методом возникающих магнитных образований с известными явлениями имеет два аспекта: пространственный и временной. В пространственном аспекте магнитные узлы должны иметь размеры, превышающие величину пространственного разрешения ($1.14''$), или, если учесть, что при обработке анализ проводится по окрестности текущей точки с двумя рядами пикселей, то втрое большую величину ($3 \times 1.14'' = 3.42''$). Также эти узлы должны иметь рельеф с крутым профилем, характерным для нового магнитного потока и обнаруживаемым на сегментированных изображе-

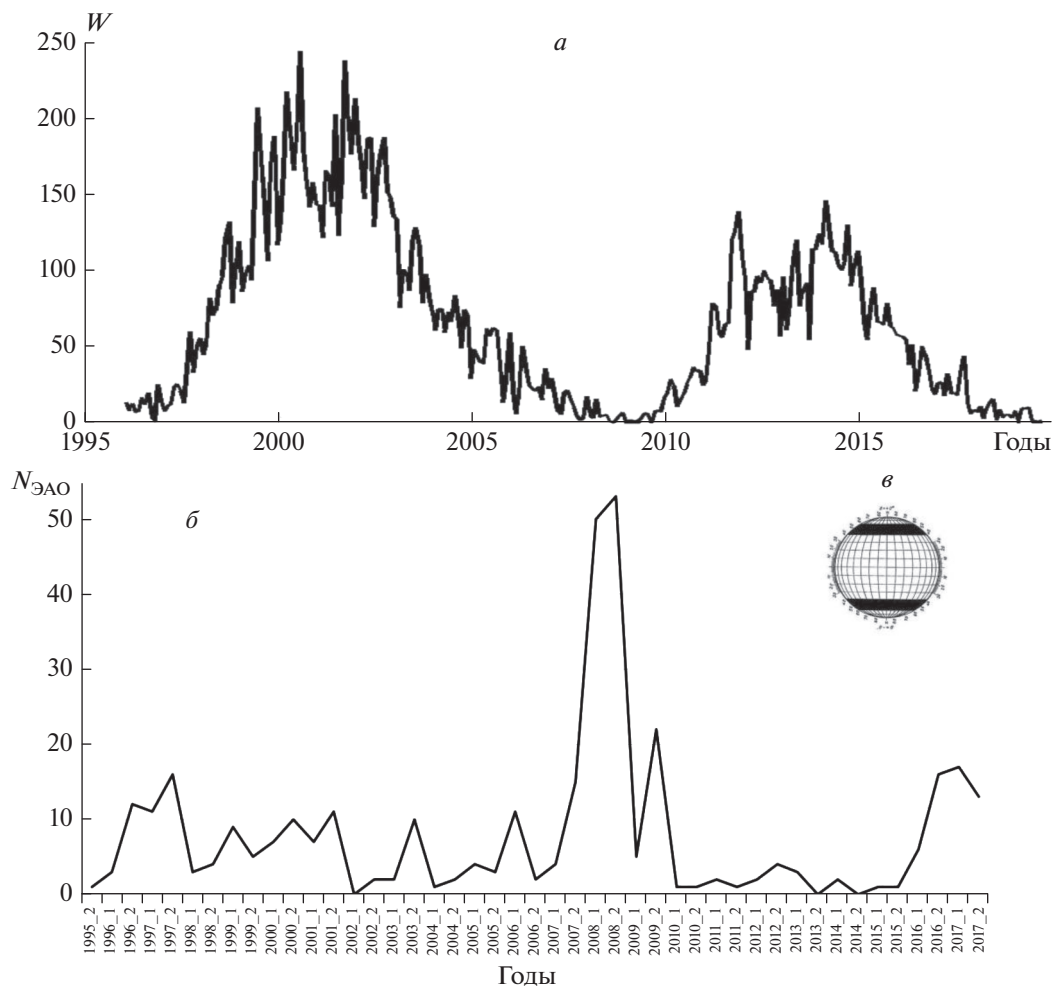


Рис. 2. (а) — ход чисел Вольфа; (б) — изменение числа магнитных узлов эфемерных АО; (в) — диск Солнца, затушеваны зоны от 40° до 60° , для которых выполнялись статистические оценки числа магнитных узлов.

ниях. Во временном аспекте следует отметить кратковременность существования узлов в состоянии “нового магнитного потока”, что ранее было обнаружено нами для элементов структуры активных областей со временем жизни 1–2 ч [Головко и Салахутдинова, 2012]. Следствием этого является отсутствие повторения положения узлов на магнитограммах за последовательные дни. Оцененная величина магнитного потока узлов находится в пределах 10^{18} – 10^{19} Мкс.

Указанные свойства и параметры магнитных узлов находятся в согласии с результатами статистического исследования магнитных образований по наблюдениям HMI SDO, опубликованным в работе [Zavaherian et al., 2017]. Там показано, что большинство (95%) элементов с площадями от 2 до 8 квадратных секунд дуги имеют времена жизни короче 100 мин.

Анализ погрешностей такого метода статистики включает следующие моменты. Во-первых, су-

ществуют ошибки в несколько гелиографических градусов при проекции изображения на координатную сетку и снятии отсчетов. Для их снижения, операция выполнялась несколько раз до получения устойчивого результата. Во-вторых, при данном методе учитываются лишь магнитные узлы в эфемерных АО, находящихся в состоянии интенсивного выхода данной малой области нового магнитного потока на момент получения магнитограммы. Поэтому наша статистика заведомо охватывала лишь часть реально появляющихся эфемерных активных областей. В-третьих, на число обнаруживаемых событий влияло текущее положение Земли на ее орбите и соответствующее значение гелиографической широты центра Солнца B_0 в пределах $\pm 7^\circ$. Была найдена зависимость числа событий от B_0 , которая показала его небольшое (до 10%) увеличение с увеличением B_0 . Все перечисленные погрешности не влияют критическим образом на результаты.

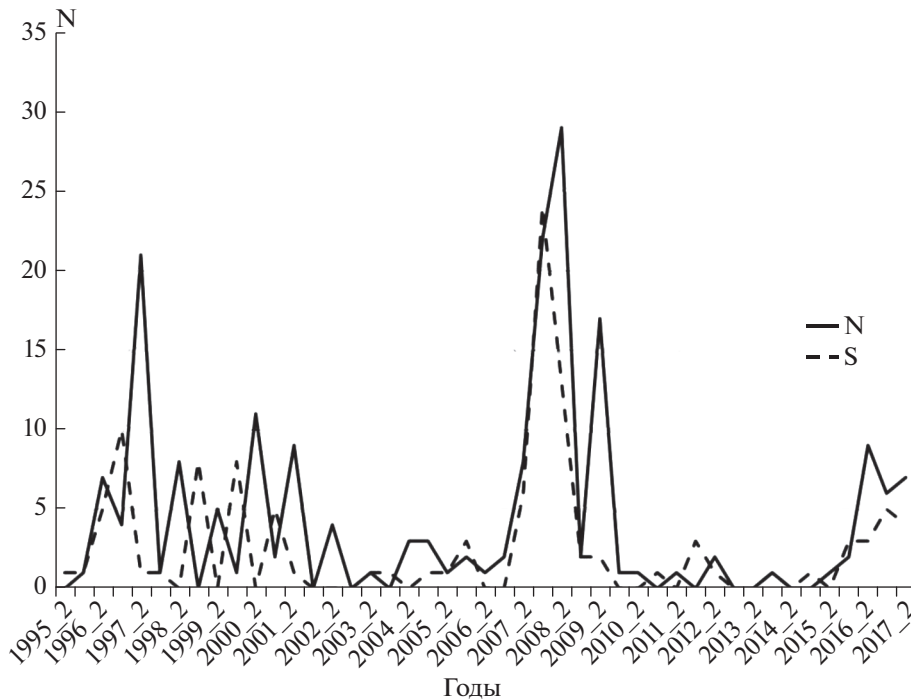


Рис. 3. Кривые изменения суммарного числа ЭАО по полушариям.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Циклические вариации числа событий

Временной ход числа событий для зоны средних широт, суммарно по интервалам в полгода и по обоим полушариям, в сопоставлении с кривой чисел Вольфа по данным [SIDC – Solar Influences Data Analysis Center], показан на рис. 2. Обращают на себя внимание всплески числа узлов в 1997 и 2008 гг., а также начавшийся подъем с 2016 г. К сожалению, в октябре 2017 г. наблюдения на VM SOLIS временно прекратились. Пик 1997 г. менее выражен, чем 2008 г., вероятно по причине меньшей чувствительности магнитографа до 2003 г., когда был введен в эксплуатацию SOLIS. На рисунке 3 приведены временные реализации числа событий, отдельно по северной и южной полусферам Солнца. Видно явное преобладание активности в северной полусфере, соответствующее ситуации в основном экваториальном поясе, где возникают развитые активные области.

24-й солнечный цикл явился началом эпохи низких солнечных циклов [Ишков, 2018]. Вторичный пик числа магнитных узлов в 2009 г. (рис. 2) можно объяснить расширением зоны мелкомасштабной активности на средних гелиоширотах в течение первого всплеска числа активных областей 24-го солнечного цикла. Похожее явление отмечается для 2000–2001 гг. и 2012–2013 гг. (рисунки 2, 3). Необходимо отметить, что во время высоких солнечных циклов, например, в 19-м

цикле с максимумом в 1957 г. в зону средних гелиоширот часто вторгались большие развитые активные области [Гневыхева, 1962], подобное явление было и в 22-м цикле.

3.2. Предвестник начала 25-го солнечного цикла

Начало солнечного цикла традиционно ассоциируется с увеличением числа Вольфа и массовым появлением АО в “королевской зоне” широт. Вместе с тем, обычно первые АО нового цикла, определяемые по ориентации диполей, появляются на широтах $30^\circ \pm 10^\circ$ с короткоживущими группами пор, не вносящими существенного вклада в число Вольфа. Если взять это явление за критерий начала цикла, то массовое появление (больше 10 в квартал) новых АО состоялось в первом квартале 2019 г. В первом полугодии 2016 г. началось увеличение числа магнитных узлов, аналогичное ситуации 2-го полугодия 2007 г., что можно считать предвестником начала 25-го цикла солнечной активности. Массовое появление АО нового 25-го цикла произошло позже всплеска числа ЭАО примерно на 2.5 г. (для 24-го цикла эта задержка составила 2 г.). Активные области нового 25-го цикла регистрируются наблюдениями с 2017 г., и в первом квартале 2019 г. число их составило 12 (в марте 2019 г. это были АО №№ 12734–12737 по NOAA). Биполярные АО нового цикла, в которых не наблюдались пятна, не получали номера по NOAA, но они хорошо

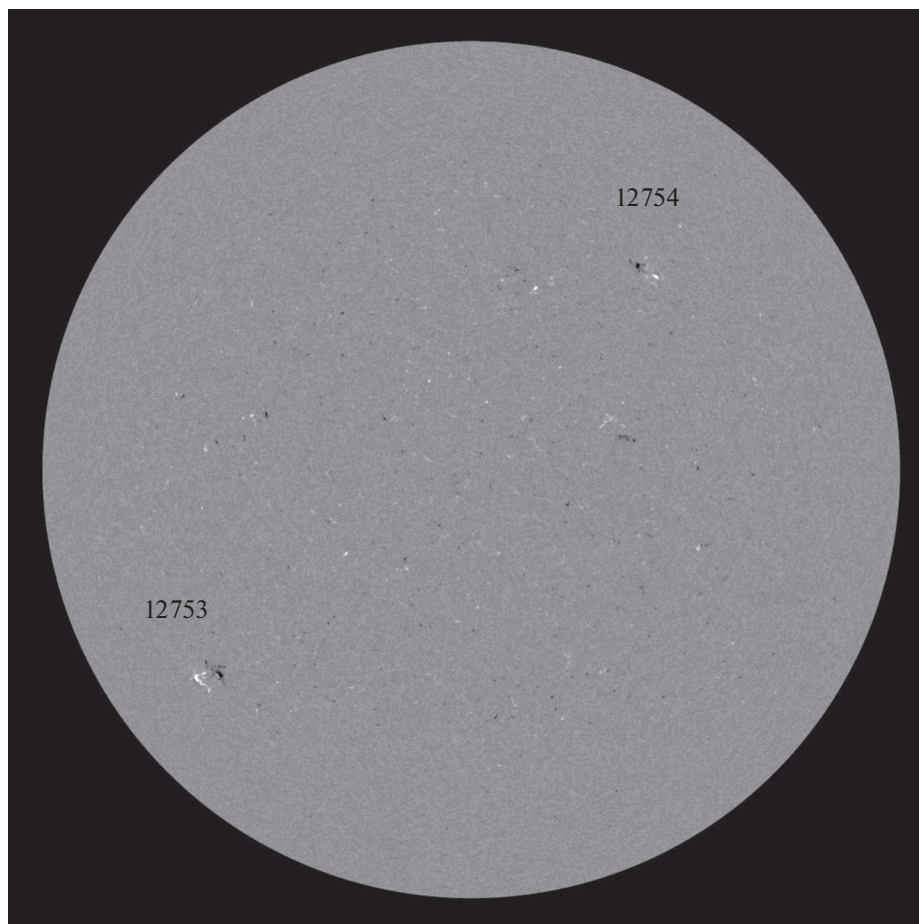


Рис. 4. Магнитограмма HMDI SDO за 25 декабря 2019 г. с активными областями № 12753 и № 12754.

видны на ежедневных магнитограммах. Во втором и третьем кварталах их число несколько уменьшилось (АО №№ 12738–12752, старого и нового циклов), но в четвертом квартале 2019 г. наблюдалось 13 АО нового цикла. На рисунке 4 показана магнитограмма диска Солнца за 25 декабря 2019 г. с активными областями № 12753 и № 12754. В начале 2020 г. возникли АО №№ 12753, 12755, 12756 нового цикла. Такое развитие цикла согласуется с прогнозом, сделанным в работе [Safiullin et al., 2018] на основе теории солнечного динамо. Метод основан на комбинации численного решения нелинейных уравнений динамо среднего поля и метода искусственной нейронной сети.

Сопоставление кривой изменения числа магнитных узлов на средних широтах с ходом числа активных областей нового цикла (рис. 5) отражает изложенный выше результат. Всплеск появления магнитных узлов может служить предвестником или фактом ранней диагностики начала нового цикла активности, что может быть использовано в прогностической практике.

3.3. Широтно-временная и долготная расчлененность рождения магнитных узлов

Полученные в нашей работе данные в форме кэррингтоновских координат событий рождения магнитных узлов дают возможность получить анализ их долготного и широтно-временного распределения. Картина развития солнечного цикла, отражаемая широтно-временной диаграммой, например, в работе [Golubeva and Mordvinov, 2017] – существенно дополняет описание цикла кривой чисел Вольфа: на этой диаграмме можно видеть перекрытие соседних циклов в период минимума активности.

Распределение узлов по кэррингтоновской долготе оказалось довольно равномерным, без выраженной концентрации к преимущественным долготам, что совпадает с выводами работы Harvey [1993].

Широтно-временное распределение узлов за 2002–2017 гг. приведено на рис. 6. Диаграмма охватывает не только зону средних широт, но и полярную область выше 60° ; тем не менее, сделать вывод о дрейфе от верхних широт к низким

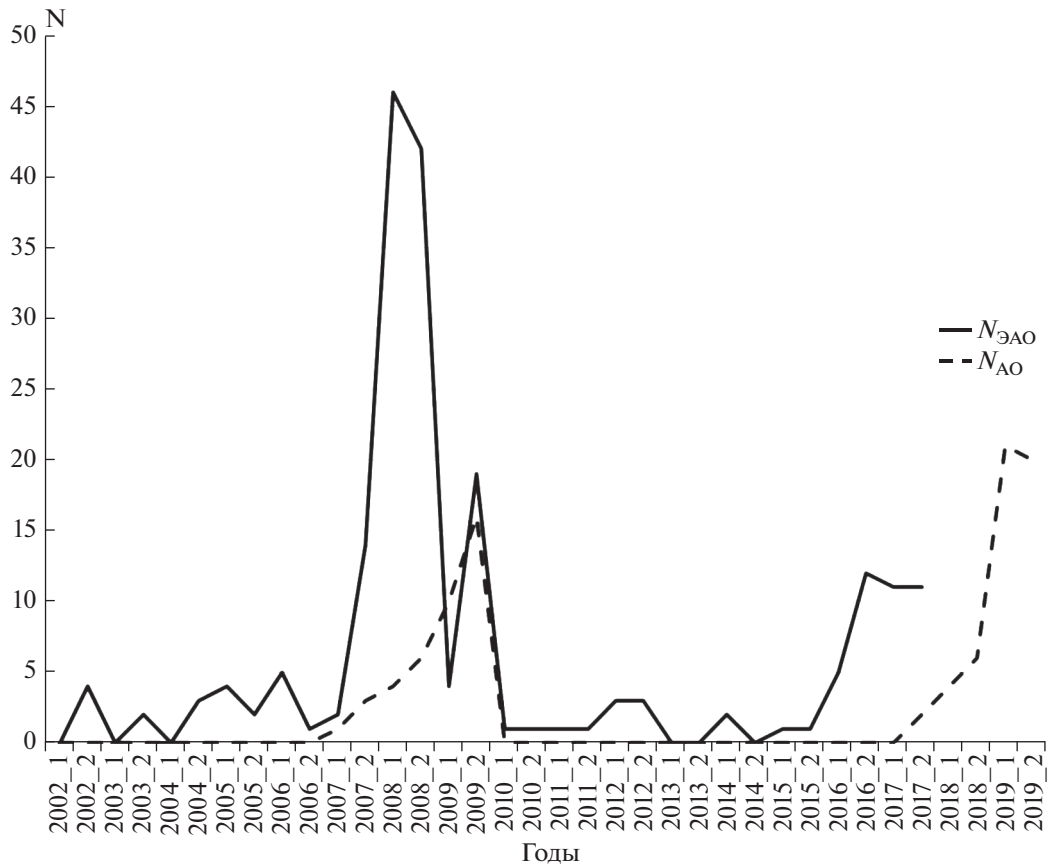


Рис. 5. Кривая числа узлов $N_{\text{ЭАО}}$ в сопоставлении с кривой числа новых высокоширотных АО $N_{\text{АО}}$ в 24-м и 25-м солнечных циклах.

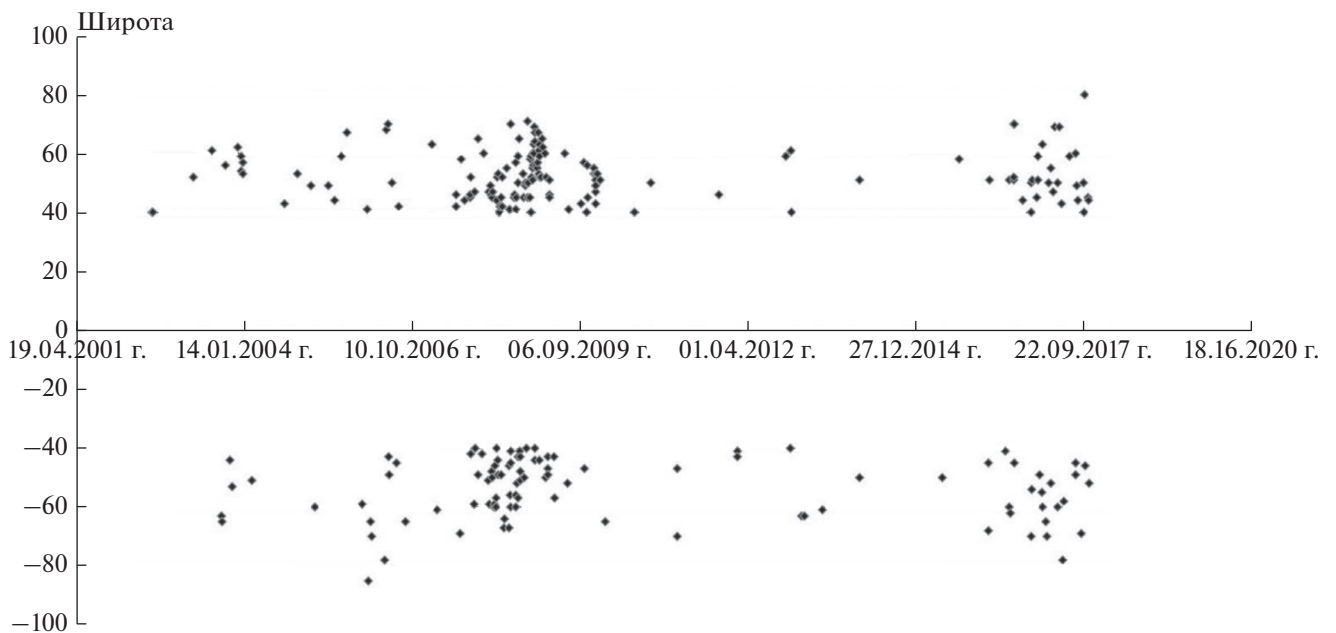


Рис. 6. Диаграмма “широта–время” ЭАО за 2000–2017 гг.

при этой статистике не представляется возможным. Сопоставление с широтно-временной диаграммой развития солнечных циклов, опубликованной в работе [Golubeva and Mordvinov, 2017], указывает на очевидную возможность экстраполяции полосы основной активности (“бабочек Маундера”) в зону средних широт и более ранних моментов времени, что соответствует концепции работы [Wilson et al., 1988]. Однако есть факты, не согласующиеся с такой интерпретацией. В работе [Kosovichev and Pipin, 2019] по данным гелиосейсмологии выявлены зоны ускоренного и замедленного (относительно среднего дифференциального) вращения слоев Солнца, а также его ускорения и замедления со временем. Зона основной пятенной активности 24-го солнечного цикла на диаграмме широта–время совпадает с границей раздела указанных зон ускоренного и замедленного вращения, причем зона ускоренного вращения располагается ближе к экватору, чем замедленная. В то же время, на диаграммах для приповерхностных слоев конвективной зоны, есть вторая ветвь таких зон, дрейфующая в направлении полюса в каждой полусфере. При сравнении указанной диаграммы работы [Kosovichev and Pipin, 2019, Figure 1c] с приведенной на рис. 6, обнаружено пространственное совпадение облака точек, соответствующих магнитным узлам, на широтах 40° – 60° в 2008–2009 гг. в северной полусфере с границей зон ускоренного и замедленного вращения, дрейфующих к полюсу. То же совпадение обнаружено для южной полусферы в 2007–2008 гг. Таким образом, явление предвестника начала цикла на средних широтах оказалось связано с вторичной слабой зоной активности, дрейфующей к полюсу.

4. ВЫВОДЫ

Наблюдения проявлений солнечной активности на средних и в высоких широтах Солнца достаточно хорошо изучены для предыдущих циклов активности, и сформулирована концепция начала солнечного цикла в высоких широтах [Makarov and Makarova, 1996; Platov, 2009]. Мы обратили внимание на повышение мелкомасштабной активности в зоне средних широт (40° – 60°) за 2 г. до начала 24-го цикла, используя доступный нам метод мультифрактальной сегментации. Такой же вывод может быть получен путем статистики магнитных узлов в указанной зоне по последовательностям магнитограмм с хорошим пространственным разрешением. Этот результат содержит возможность ранней диагностики начала любого солнечного цикла и его последствий с учетом влияния Солнца на земные процессы.

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

Применение метода мультифрактальной сегментации к зоне гелиоширот выше 40° выявило популяцию магнитных узлов эфемерных активных областей, число которых меняется в корреляции с циклом солнечной активности.

В 2007 г., за 2 г. до начала 24-го солнечного цикла, произошло увеличение числа магнитных узлов на средних широтах (40° – 60°), существенно превышающих фоновое значение, отмеченное в 2010–2015 гг. Несколько меньший по амплитуде эффект наблюдается синхронно для полярной зоны широт более 60° . Найденную совокупность фактов можно считать ранней диагностикой начала цикла.

Начало возрастания числа магнитных узлов с 2016 г., аналогичное эффекту 2007 г., можно считать предвестником начала 25-го солнечного цикла в 2019 г., проявлением которого явилось массовое (более 10 за квартал) появление малых биполярных активных областей с ориентацией магнитных осей, соответствующих новому циклу.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность В.В. Пипину и Н.И. Клиорину за полезные обсуждения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы фундаментальных научных исследований ФНИ П.16.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абраменко В.И. МГД-турбулентность в областях на Солнце с различным уровнем вспышечной активности // *Астрон. журн.* Т. 79. № 1. С. 182–192. 2002.
- Гневышева Р.С. Каталог солнечной деятельности за 1957 г. Тр. Главной астрономической обсерватории в Пулковке АН СССР. Изд-во “Наука”, Ленинградское отделение. 230 с. 1962.
- Головкин А.А. Соотношение между максимальным магнитным потоком и временем жизни солнечных активных областей // *Астрон. журн.* Т. 75. № 4. С. 618–625. 1998.
- Головкин А.А., Салахутдинова И.И. Фрактальные свойства активных областей // *Астрон. журн.* Т. 89. № 6. С. 458–464. 2012.
- Головкин А.А., Салахутдинова И.И. Эволюция активных областей на Солнце: выявление нового магнитного поля методом мультифрактального сегментирования // *Астрон. журн.* Т. 92. № 8. С. 650–664. 2015.
- Ишков В.Н. Прогноз космической погоды: принципы построения и границы реализации (опыт трех циклов) // *Космич. исслед.* Т. 55. № 6. С. 391–398. 2017.
- Ишков В.Н. Космическая погода и особенности развития текущего 24-го цикла солнечной активности // *Геомагнетизм и аэронавигация.* Т. 58. № 6. С. 785–800. 2018.

- Макаренко Н.Г., Князева И.С. Мультифрактальный анализ цифровых изображений // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. Т. 17. № 5. С. 85–98. 2009.
- Чистяков В.Ф. Полярные факелы Солнца // Методы и результаты исследования Солнца. Сборник научных трудов. Владивосток: ДВНЦ АН СССР. С. 3–36. 1986.
- Abramenko V.I., Yurchishyn V.B., Wang H. et al. Scaling behavior of structure functions of the longitudinal magnetic field in active regions on the Sun // *Astrophys. J.* V. 577. P. 487–495. 2002.
- Beckers J.M., Schroter E.H. Magnetic knots near a sunspot / Structure and Development of Solar Active Regions. Proc. IAU Symp. No. 35. Budapest, Hungary, September 1967. Ed. K.O.Kiepenheuer, Reidel, Dordrecht. P. 178–188. 1967.
- FRACLAB(A fractal analysis toolbox for signal and image processing) // <http://fraclab.saclay.inria.fr>
- Golubeva E.M., Modvinov A.V. Rearrangements of open magnetic flux and formation of polar coronal holes in cycle 24 // *Solar Phys.* V. 292. 175. 2017. <https://doi.org/10.1007/s11207-017-1200-6>
- Grigoryev V.M. Magnetic knots near a sunspot // *Solar Phys.* V. 6. P. 67–71. 1969.
- Gelfreikh G.B., Makarov V.I., Tlatov A.G., A. Riehokainen A.G., Shibasaki K. A study of the development of global solar activity in the 23rd solar cycle based on radio observations with the Nobeyama radio heliograph II. Dynamics of the differential rotation of the Sun // *Astron. Astrophys.* V. 389. P. 618–623. 2002.
- Harvey K.L. Magnetic bipoles on the Sun. Utrecht, The Netherlands: Univ. of Utrecht. 331 p. 1993.
- Harvey K.L., Martin S. Ephemeral active regions // *Solar Phys.* V. 32. P. 389–402. 1973.
- Henney C.J., Keller C.V., Harvey J.W. SOLIS – VSM Solar Vector Magnetograms // *Solar Polarization 4*, ASP Conf. Ser. V. 358. P. 92–95. 2006.
- Jones Y.P., Duvall T.L., Harvey J.W., Mahaffey C.T., Schwitters J.D., Simmons J.E. The NASA/NSO spectromagnetograph // *Solar Phys.* V. 139. № 2. P. 211–232. 1992.
- Kosovichev A.G., Pipin V.V. Dynamo wave patterns inside the Sun revealed by torsional oscillations // *Astrophys. J. Lett.* V. 871. № 2. L20–L28. 2019.
- LaBonte B.J., Howard R. Torsion waves on the Sun and the activity cycle // *Solar Phys.* V. 75. P. 161–178. 1982.
- Lawrence J.K., Ruzmaikin A.A., Kadavid A.C. Multifractal measure of the solar magnetic field // *Astrophys. J.* V. 417. P. 805–811. 1993.
- Levy-Vehel J., Vojak R. Multifractal analysis of Choquet Capabilities // *Adv. Appl. Math.* V. 20. № 1. P. 1–43. 1998. <https://doi.org/10.1006/aama.1996.0517>
- Makarov V.I., Makarova V.V. Polar faculae and sunspot cycles // *Solar Phys.* V. 163. P. 267–290. 1996.
- Maruyama F., Kai K., Morimoto H. Wavelet-based multifractal analysis on a time series of solar activity and PDO climate index // *Adv. Space Res.* V. 60. P. 1363–1372. 2017.
- Namekata K., Machara H., Notsu Y. et al. Lifetimes and emergence/decay rates of star spots on Solar-type Stars Estimated by Kepler Data in Comparison with Those of Sunspots // *Astrophys. J.* V. 871. № 2. 187. 2019. [Doi.org/10.3847/1538-4357/aaf471](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaf471)
- NSO/NISP: SOLIS Full-Disk Images // https://solis.nso.edu/0/solis_data.html
- Safiullin N., Kleorin N., Porshnev S., Rogachevskii I., Ruzmaikin A. Nonlinear mean field dynamo and prediction of solar activity // *J. Plasma Physics.* V. 84. № 3. 735840306. 2018. <https://doi.org/10.1017/S0022377818000600>
- Sheeley N.R. Jr. Polar faculae during the sunspot cycle // *Astrophys. J.* V. 140. P. 731–735. 1964.
- SIDC-Solar Influences Data Analysis Center // <http://sidc.oma.be/index.php3/silso>
- Skumanich A., Lites B.W. Stokes profile analysis and vector magnetic fields. I. Inversion of photospheric lines // *Astrophys. J.* V. 322. P. 473–482. 1987.
- Tlatov A.G. The Minimum activity epoch as a precursor of the Solar activity // *Solar Phys.* V. 260. P. 465–477. 2009.
- Wilson P.R., Altrock R.C., Harvey K.L., Martin S.F., Snodgrass H.B. The extended solar activity cycle // *Nature* V. 333. P. 748–750. 1988.
- Zavaherian M., Safari H., Dadashi N., Aschwanden M.J. Statistical properties of photospheric magnetic elements observed by the Helioseismic and Magnetic Imager onboard the Solar Dynamics Observatory // *Solar Phys.* V. 292. P. 164. 2017. <https://doi.org/10.1007/S11207-1189-x>