

УДК 523.9

## ЦИКЛИЧЕСКИЕ ВАРИАЦИИ, МАГНИТНАЯ МОРФОЛОГИЯ И СЛОЖНОСТЬ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ В 23-М И 24-М СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛАХ

© 2020 г. А. В. Жукова<sup>1, \*</sup>, Д. Д. Соколов<sup>2, \*\*</sup>, В. И. Абраменко<sup>1</sup>, А. И. Хлыстова<sup>3, \*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Крымская астрофизическая обсерватория РАН (КРАО РАН), пгт. Научный, Республика Крым

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ), г. Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН (ИСЗФ СО РАН), г. Иркутск, Россия

\*e-mail: anastasiya.v.zhukova@gmail.com

\*\*e-mail: sokoloff.dd@gmail.com

\*\*\*e-mail: hlystova@iszf.irk.ru

Поступила в редакцию 28.03.2020 г.

После доработки 21.04.2020 г.

Принята к публикации 21.05.2020 г.

Изучены 2046 активных областей 23-го и 1507 – 24-го солнечных циклов с мая 1996 по декабрь 2018 гг. Группы солнечных пятен распределены в соответствии с недавно предложенной магнито-морфологической классификацией. Выделены регулярные активные области, которые подчиняются закону полярностей Хейла, закону Джоя, с лидирующим пятном, преобладающим над основным хвостовым пятном, а также нерегулярные группы солнечных пятен и одиночные пятна. Показано, что основной вклад в развитие цикла вносят регулярные активные области, что согласуется с моделями магнитного цикла. Вклад нерегулярных групп солнечных пятен примерно в 2–5 раз меньше (в максимумах цикла) и сопоставим с вкладом регулярных активных областей в минимумах цикла, что может свидетельствовать о совместном действии глобального динамо среднего поля и флуктуационного динамо. Увеличение количества нерегулярных активных областей в южном полушарии во втором максимуме каждого из исследованных циклов можно объяснить ослаблением тороидального поля (произведенного глобальным динамо) и увеличением вклада флуктуационного динамо в их конкурентном взаимодействии. Сравнение кривых, отображающих временную зависимость индекса асимметрии групп солнечных пятен для регулярных и нерегулярных активных областей, показало, что регулярные активные области опережают нерегулярные активные области на ~1.5–2 г. при переходе активности в южное полушарие. Применение магнито-морфологической классификации позволило обнаружить поочередную активность северного и южного полушария в обоих исследованных циклах; очередность срабатывания полушарий изменяется от цикла к циклу; для регулярных и нерегулярных активных областей в данном цикле наблюдается обратная по отношению друг к другу очередность. Сравнение наших результатов с результатами, полученными ранее другими авторами по циклическим вариациям групп солнечных пятен простой и сложной магнитной конфигурации в разных полушариях, показало, что чем сильнее произведенное глобальным динамо тороидальное поле, тем сложнее обнаружить проявления NS-асимметрии и судить о воздействии флуктуационного динамо на магнитные трубки активных областей.

DOI: 10.31857/S0016794020060164

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Процессы эволюции магнитных полей на Солнце и механизмы солнечного цикла не ясны в полной мере. С момента открытия Швабе 11-летнего цикла [Schwabe, 1844] для солнечных пятен и систематизации Вольфом более ранних наблюдательных данных [Wolf, 1857] циклические вариации солнечных пятен являются неизменным предметом исследования. Эпоху систематического изучения солнечной циклическости открыла серия работ Шперера, сформулировавшего в точ-

ной форме закон об изменении широты зон образования солнечных пятен с ходом цикла, и Маундера, представившего графическое выражение этого закона в виде широтно-временной диаграммы (см., например, [Spörer, 1865; Maunder, 1890, 1904]). Мы обязаны Вольфу формированием первого длительного ряда наблюдений для групп солнечных пятен [Wolf, 1851, 1856]; позднее ряд был существенно модифицирован [Hoyt and Schatten, 1998a, b]. С появлением высокоточных инструментов на борту космических обсервато-

рий [Scherrer et al., 1995, 2012; Tsuneta et al., 2008] открылись возможности для статистических исследований магнитных полей активных областей (АО) (см, например, [Stenflo and Kosovichev, 2012; Li and Ulrich, 2012; McClintock et al., 2014; Pevtsov et al., 2014; Li, 2018]). Количество солнечных пятен и их суммарные площади приобрели также значение сравнительных характеристик, иллюстрирующих ход солнечного цикла, что широко используется при изучении других проявлений солнечной активности (см., например, [Bertello et al., 2016; Nagovitsyn et al., 2016; Egorova et al., 2018; Mazumder, 2019]).

Следует особо отметить статистические исследования некоторых подмножеств всей совокупности появляющихся на диске Солнца активных областей (АО) – групп солнечных пятен, обладающих определенными, отличными от других, характеристиками. Известно, что для АО был установлен ряд эмпирических закономерностей: закон полярностей Хейла, закон Джоя [Hale et al., 1919; Hale and Nicholson, 1925] и некоторые другие. На эти эмпирические правила опираются классические модели магнитного цикла Бэбкока–Лейтона [Babcock, 1961; Leighton, 1964] и Паркера [Parker, 1955]; подчиняющиеся им группы солнечных пятен можно, с некоторой степенью условности, считать обычными (регулярными). Действие вышеуказанных закономерностей распространяется на теорию глобального динамо среднего поля [Moffat, 1978; Krause and Rädler, 1980]; они остаются в силе для более поздних динамо-моделей [Obridko et al., 2006; Sokoloff and Khlystova, 2010; Brandenburg et al., 2012; Miesch, 2012; Kitchatinov, 2014]. Однако для некоторых групп солнечных пятен наблюдается нарушение закономерностей теории динамо среднего поля. Можно предположить, что такие отклонения связаны с предсказанным теоретически наличием флуктуаций магнитного поля, происходящих на более мелких, по сравнению со средним полем, масштабах. Возможные флуктуации были предсказаны как турбулентной теорией динамо (см., например, [Казанцев, 1967; Zeldovich et al., 1990; Brandenburg and Subramanian, 2005]), так и прямым численным моделированием (см., например, [Moffatt, 1978; Krause and Rädler, 1980; Rädler et al., 2003; Sur et al., 2008; Brandenburg et al., 2012]). Для проверки этих предположений необходимо статистическое изучение АО с отклонением от закономерностей теории динамо среднего поля.

Первые исследования нерегулярных АО были выполнены по группам солнечных пятен, нарушающим закон полярностей Хейла (в англоязычной литературе для таких АО в последние десятилетия часто применяется термин “anti-Hale”) [Hale, 1919]. Согласно этому закону лидирующие пятна биполярных групп имеют разную поляр-

ность в северном и южном полушариях; при переходе к следующему 11-летнему циклу полярность лидеров АО меняется на противоположную. Среди биполярных групп, имеющих простую биполярную магнитную конфигурацию, Хейлом и Николсоном было обнаружено <6% (2.4% в среднем) АО с обратной полярностью [Hale and Nicholson, 1925]. Именно такие группы пятен авторы впервые назвали “нерегулярными”. В последующих работах приводятся сходные оценки: 3.1% [Richardson, 1948]; <5% [Smith and Howard, 1968]. В современной литературе оценки процентного содержания групп солнечных пятен с нарушением закона полярностей Хейла колеблются от нескольких единиц до ~10%. Лишь часть авторов [Wang and Sheeley, 1989; Sokoloff and Khlystova, 2010; Stenflo and Kosovichev, 2012] представляет результаты, совпадающие с полученными ранее оценками. В других работах [Li and Ulrich, 2012; McClintock et al., 2014; Li, 2018] заявлено процентное содержание АО с нарушением закона полярностей Хейла ~8%. Различия в оценках могут быть связаны как с использованием новых высокоточных инструментов для измерения магнитных полей, так и с критериями отбора АО. При исследовании циклических вариаций АО с нарушением закона полярностей Хейла было обнаружено [McClintock et al., 2014; Sokoloff et al., 2015] увеличение их процентного содержания в минимумах нескольких солнечных циклов. В работах [Abramenko et al., 2018; Zhukova et al., 2019] также обнаружено возрастание доли магнитного потока от АО с нарушением закона полярностей Хейла вблизи наступающего минимума 24-го цикла. Эффект может быть связан с проявлением действия флуктуационного динамо в моменты наименьшей активности глобального динамо.

Другим видом нерегулярности групп солнечных пятен является нарушение закона Джоя, описанного впервые в работе [Hale et al., 1919]. Закон Джоя определяет угол наклона оси биполярных АО (в англоязычной литературе принят термин “tilt”). Вершину этого угла обычно полагают совпадающей с лидирующим пятном АО; образующие угол лучи – направленными параллельно экватору и по направлению к хвостовому пятну. Согласно закону Джоя лидирующие пятна АО расположены ближе к экватору, а хвостовые – несколько дальше (угол наклона принимает положительные значения); наклон возрастает с увеличением широты; значение угла наклона варьируется, как правило, в пределах от 0° до 20° [Wang and Sheeley, 1989]. Возможными объяснениями существования наклона оси биполярных АО могут быть действие на всплывающую магнитную трубку кориолисовых сил [D’Silva and Choudhuri, 1993] и наличие подфотосферных течений [Fan and Fisher, 1996]. В работе [Fisher et al., 1995] обнаружено, что у групп солнечных пятен с большим

расстоянием между центрами тяжести пятен положительной и отрицательной полярности углы наклона оси биполярных АО имеют более высокие значения. В этой же работе авторы подтвердили высокий разброс углов наклона для мелких групп солнечных пятен, что согласуется с данными [Wang and Sheeley, 1989]. Зависимость угла наклона оси биполярных АО от величины магнитного потока не обнаружена [Stenflo and Kosovichev, 2012]. Циклические вариации углов наклона биполярных АО различаются для разных солнечных полусфер [McClintock and Norton, 2013]. Проявления северо-южной асимметрии отражаются также на абсолютном значении этой величины: в S-полусфере углы наклона оси биполярных АО принимают большие значения по сравнению с N-полусферой [Li and Ulrich, 2012]. Обнаружен систематический сдвиг углов наклона оси биполярных АО (ненулевые углы на экваторе), причем для четных/нечетных циклов наблюдается положительный/отрицательный сдвиг [Platova et al., 2018].

Предложенный в работе [Abramenko et al., 2018] подход позволяет учитывать в качестве основных критериев для каждой группы солнечных пятен оба описанных выше нарушения закономерностей теории динамо. Согласно этому подходу и разработанной авторами работы магнито-морфологической классификации (ММК) АО помимо нарушения законов Хейла и Джоя для биполярных групп солнечных пятен в качестве третьего критерия принято правило о соотношении магнитных потоков/площадей лидирующего и хвостового пятен [Grotirian and Künzel, 1950]. Приводимое соответствующее соотношение 1 : 3 объясняется Бэбкоком в рамках его модели магнитного цикла действием сил Кориолиса на всплывающую в виде петли силовую линию магнитного поля [Babcock, 1961]. Правило находится также в соответствии с наблюдательными данными: лидирующие пятна обычно живут дольше и более компактны [van Driel-Gesztelyi and Green, 2015]. Использование ММК позволило авторам работы [Abramenko et al., 2018] сравнить циклические вариации для регулярных АО и для АО с нарушениями. Усредненный годовой вклад в общий беззнаковый магнитный поток от регулярных АО колеблется от 50 до 70%; от АО с нарушениями — от 20 до 40%; остальная доля приходится на одиночные пятна. Этот результат согласуется с классическими моделями магнитного цикла [Babcock, 1961; Leighton, 1964; Parker, 1955] и может свидетельствовать об одновременном действии глобального и флуктуационного динамо, в том же объеме и в тех же пространственных масштабах (сопоставимых с АО). Возможная нижняя граница по магнитному потоку, производимому флуктуационным динамо, определена по вкладу АО с

нарушением закона полярностей Хейла и оценена  $\sim 4 \times 10^{22}$  Мкс в год.

Еще один принцип выделения из общей массы АО с определенными характеристиками основан на степени сложности их магнитной конфигурации. Введенная Хейлом [Hale et al., 1919] классификация (Хейл класс), называемая также классификацией Mount Wilson Observatory (MWO), неоднократно использовалась для статистических исследований [Hale and Nicholson, 1938; Smith and Howard, 1968]. Многочисленные работы подтверждают, что сложные магнитные классы, имеющие в составе  $\delta$ -конфигурацию, обладают высокой вспышечной активностью (см, например, [Sammis et al., 2000; Ternullo et al., 2006]). Простые и сложные АО не показывают существенной разницы в распределении по широте, что может свидетельствовать об общем объеме в конвективной зоне, служащим для них источником [Jaeggli and Norton, 2016]. Преобладание АО простой магнитной конфигурации в раннем максимуме 23-го и 24-го циклов, а сложных АО — во втором максимуме и на фазе спада может быть объяснено соревнованием между крупномасштабным и мелкомасштабным динамо [Nikbakhsh et al., 2019]. Обнаруженная при исследовании циклических вариаций простых и сложных АО в данной работе сильная северо-южная асимметрия также может быть обусловлена разницей вкладов двух динамо.

Целью данной работы является исследование циклических вариаций регулярных АО и групп солнечных пятен с нарушениями закономерностей теории динамо среднего поля; сопоставление характера временных зависимостей для АО с различной магнитной морфологией и сложностью магнитной конфигурации.

## 2. ДАННЫЕ И МЕТОД

### 2.1. Данные космических обсерваторий и базы данных

Период наших исследований с 21 мая 1996 по 31 декабря 2018 гг. охватывает два практически полных (23-й и 24-й) 11-летних цикла солнечной активности. Для визуального просмотра АО мы использовали ежедневные данные полного диска Солнца: магнитограммы, изображения в белом свете и в линиях УФ, полученные преимущественно космическими обсерваториями. Для 23-го цикла использовались данные инструмента the Michelson Doppler Imager (MDI), находящегося на борту the Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) [Scherrer et al., 1995], полученные в спектральной линии никеля NiI 6768 Å с пространственным разрешением  $4'' \times 4''$  и размером пикселя  $2'' \times 2''$ .

С момента начала работы инструмента the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI), расположенного на борту the Solar Dynamic Observatory

(SDO) [Scherrer et al., 2012], мы использовали его данные. Они получены в спектральной линии железа FeI 6173.3 Å и обеспечивают более высокое пространственное разрешение данных 1" (0.5" на пиксель). Проверка магнитных связей между солнечными пятнами внутри активных областей осуществлялась нами при помощи изображений в различных каналах инструментов the Extreme Ultraviolet Imaging Telescope (EIT) [Moses et al., 1997] и the Atmospheric Imaging Assembly (AIA) [Lemen et al., 2012]. В основном, нами использовались данные EIT/SOHO, полученные в линиях Fe IX/X 171 Å, Fe XII 195 Å и He II 304 Å, и данные AIA/SDO, полученные в линиях Fe IX/X 171 Å и 193 Å.

Мы использовали также доступные в сети интернет гелиографические данные the Debrecen Photoheliographic Data (DPD) [Baranyi et al., 2016]. Веб-сайт DPD (<http://fenyi.solarobs.csfk.mta.hu/DPD/>) предоставляет магнитограммы и зарисовки полного диска Солнца, индивидуальные изображения АО в белом свете. Эти данные получены разными обсерваториями (преимущественно, the Heliophysical Observatory of the Hungarian Academy of Science). Зарисовки DPD помогали нам восполнять пробелы в наблюдениях космических обсерваторий. Мы использовали также данные по площадям групп пятен из базы Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства США (NASA), включающей данные Королевской Гринвичской обсерватории Великобритании, Воздушных Сил и Национального управления Океанических и Атмосферных исследований США. Данные этой базы – Royal Observatory, Greenwich – USAF/NOAA Sunspot Data – доступны на веб-сайте (<https://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml>) и использовалась нами для иллюстрации развития циклов.

### *2.1. Распределение активных областей по категориям согласно магнито-морфологической классификации*

Следуя подходу, изложенному в работе [Abramenko et al., 2018], мы рассмотрели все АО, появившиеся на видимой поверхности диска Солнца трижды за солнечный оборот в пределах не более 60° от центрального меридиана, получив непрерывную серию непересекающихся “портретов” “пятенной” активности Солнца. В соответствии с разработанной авторами данной работы ММК, мы распределили исследуемые АО на следующие категории. В группу А вошли регулярные биполярные АО, подчиняющиеся закону Хейла, закону Джоя, имеющие лидирующее пятно, преобладающее по площади над основным хвостовым пятном. Категория Б включает в себя АО, у которых нарушена по крайней мере одна из указанных закономерностей. Три основных подмножества

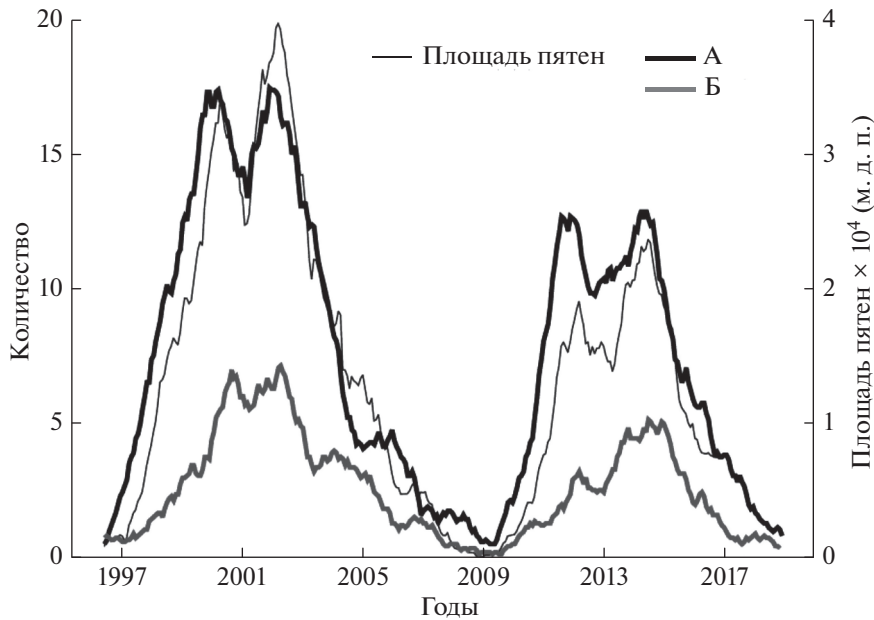
этой группы составляют АО, у которых наблюдается каждое конкретное нарушение. В отличие от работ [Abramenko et al., 2018; Zhukova et al., 2019], при классификации АО 23-го (более сильного, чем 24-й) цикла возникла необходимость в выделении в отдельное подмножество АО категории Б групп солнечных пятен, имеющих сложную многополярную магнитную структуру (АО, у которых затруднительно выделить основные ведущее и хвостовое пятно). К третьей категории АО относятся одиночные пятна.

При определении полярности лидирующих пятен АО на границах циклов могут возникать трудности при распределении групп солнечных пятен между ними. Для определения принадлежности АО к тому или иному циклу в период минимума солнечной активности мы использовали методику, предложенную в работе [McClintock et al., 2014]. При определении принадлежности АО к “нарушителям” закона Джоя мы следовали подходу, описанному в работе [Wang and Sheeley, 1989], и считали нормальными углы наклона оси биполярных групп солнечных пятен, находящиеся в пределах от 0° до 20° (считая от экватора). Отклонения от данного правила, возникающие у всплывающих групп солнечных пятен, нами не учитывались, т.к. время установления угла наклона оси биполярной АО составляет около трех дней [van Driel-Gesztelyi and Green, 2015]. Для АО с сильно раздробленным хвостовым пятном в качестве угла наклона оси мы определяли биссектрису угла, содержащего в основании лидирующее пятно, и чьи лучи ограничивают с боков хвостовую область. Мы считали, что у АО нарушено правило о соотношении площадей лидирующего и последующего пятен в случае явного преобладания по площади хвостового пятна над лидирующим. Для АО, изменяющих свои свойства (угол наклона оси, полярность лидера и др.) в процессе эволюции, мы учитывали состояние данной группы солнечных пятен в дни, ближайšie к моменту наблюдения.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

### *3.1. Циклические вариации и NS-асимметрия регулярных/нерегулярных активных областей*

Были изучены 2046 АО 23-го и 1507 АО 24-го солнечных циклов, появившихся на видимой поверхности диска Солнца в период с мая 1996 по декабрь 2018 гг. Временные зависимости для регулярных (толстая черная линия) и нерегулярных (толстая серая линия) АО представлены на рис. 1; количество зарегистрированных АО просуммировано за оборот и сглажено за тринадцать оборотов методом скользящего среднего. Тонкая черная линия для обработанной таким же образом суммарной площади солнечных пятен иллюстри-



**Рис. 1.** Суммарное количество регулярных (толстая черная линия) и нерегулярных (толстая серая линия) АО за солнечный оборот, сглаженное методом скользящего среднего за 13 оборотов; кривая для суммарной площади солнечных пятен (тонкая черная линия), прошедшей такую же обработку, иллюстрирует ход цикла.

рует ход цикла. Сравнение циклических вариаций регулярных и нерегулярных групп солнечных пятен показывает следующее. На фазе роста каждого из двух циклов рост количества регулярных АО несколько опережает рост площадей солнечных пятен; на фазе спада циклов соответствующие кривые синхронизированы. Это может объясняться сравнительно малыми размерами АО в начале цикла. Основной вклад в развитие цикла вносят регулярные АО, что полностью согласуется с классическими моделями магнитного цикла [Babcock, 1961; Leighton, 1964]; вклад нерегулярных групп солнечных пятен меньше (примерно в 2–5 раз) в максимумах цикла и сопоставим со вкладом регулярных АО в минимумах цикла. Эффект может быть объяснен совместным действием глобального динамо (ответающего за производство магнитных трубок АО) и флуктуационного динамо (вмешивающегося в процесс их всплытия сквозь конвективную зону). Это согласуется с выводами, сделанными в работах [Abramenko et al., 2018] и [Nikbakhsh et al., 2019]. Вклад регулярных АО в оба максимума каждого из двух исследованных циклов примерно одинаков. Усиление солнечной активности во втором максимуме каждого из двух циклов обеспечивается АО с нарушениями закономерностей теории динамо среднего поля. Обнаруженный количественный эффект для нерегулярных АО во втором максимуме цикла может дополнительно усиливаться для магнитных потоков таких АО, поскольку для них характерны наибольшие значения удельного магнитного

потока (рассчитанного на одну АО) [Abramenko et al., 2018], а максимальная его величина приходится именно на второй максимум цикла. Эффект объясняется действием флуктуационного (мелкомасштабного, турбулентного) динамо, которое искажает и дополнительно закручивает исходный магнитный поток, тем самым усиливая его. Влиянием мелкомасштабного динамо также был объяснен сходный результат, обнаруженный для максимума месячного количества АО сложной магнитной конфигурации во втором максимуме 23-го и 24-го циклов в работе [Nikbakhsh et al., 2019]. Во время второго максимума цикла вклад глобального динамо падает; роль мелкомасштабного динамо в процессе формирования и эволюции групп солнечных пятен возрастает. Таким образом, ослабление произведенного глобальным динамо тороидального поля в ходе цикла может приводить к усилению влияния флуктуационного динамо; эффект проявляется в образовании нерегулярных АО.

Далее мы исследовали циклические вариации регулярных (рис. 2а) и нерегулярных (рис. 2б) АО по отдельности в каждом из двух полушарий (толстые черные линии). Группы солнечных пятен, появившиеся в северном и южном полушариях, представлены сплошной и пунктирной линиями, соответственно. Видно, что первый максимум регулярных АО 23-го цикла обеспечивается в большей степени группами пятен южного, а второй — северного полушария; в 24-м цикле, напротив, северное полушарие срабатывает раньше, а явле-

ние асимметрии между полушариями выражено в большей степени (большая относительная высота пиков). Сравнение циклических вариаций для регулярных и нерегулярных АО показало, что очередная активность двух полушарий в первом и втором максимумах цикла наблюдается для обеих категорий. При этом для нерегулярных АО полушария срабатывают в обратной, по сравнению с регулярными АО, последовательности. Эффект хорошо заметен в 23-м цикле; он проявляется также и для групп солнечных пятен в северном полушарии в 24-м цикле. Однако для АО южного полушария в 24-м цикле наблюдается сбой: их активность значительно преобладает не в первом максимуме цикла (как могло бы ожидаться), а во втором, как и для АО северного полушария. При этом относительная величина пика для АО южного полушария во втором максимуме достаточно велика.

Дополнительные тенденции в проявлении NS-асимметрии позволил выявить нормализованный индекс асимметрии  $\Delta$ , рассчитанный по формуле

$$\Delta = (N - S)/(N + S), \quad (1)$$

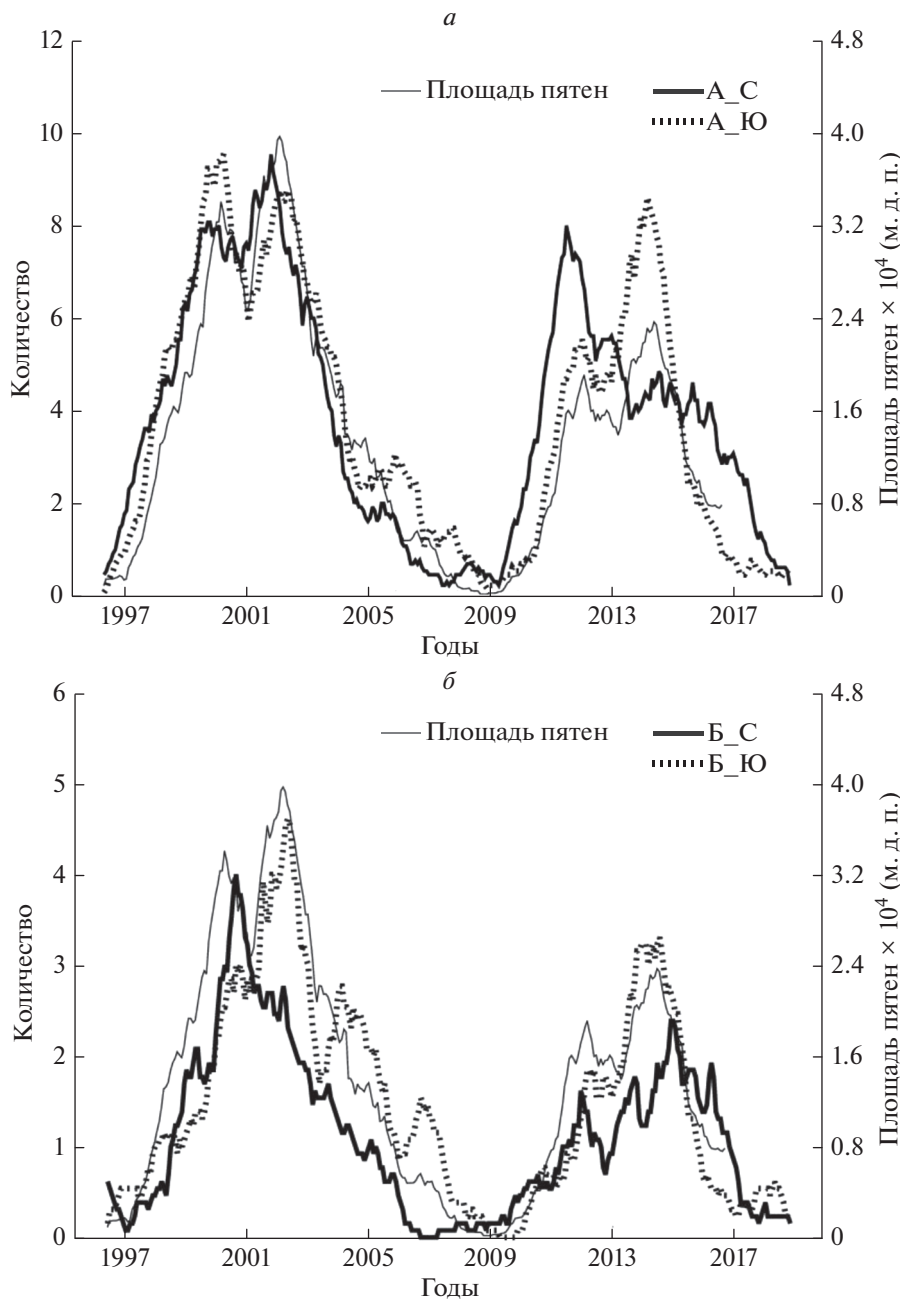
где  $N$  и  $S$  – количество АО исследуемой категории в северном и южном полушарии, соответственно. На рисунке 3 представлены циклические вариации индекса асимметрии (нижняя панель) для регулярных (черная линия) и нерегулярных (серая линия) АО; ход цикла представлен при помощи кривой для суммарных площадей солнечных пятен (верхняя панель). Как видно было из проведенного выше сравнения рис. 2а и рис. 2б, для регулярных и нерегулярных групп пятен наблюдается взаимно обратная очередность в активности северного и южного полушарий. Однако ход линий для индекса асимметрии на рис. 3 показывает, что срабатывание полушарий для регулярных и нерегулярных АО примерно в противофазе наблюдается только в период нарастания активности и в момент первого максимума цикла. Наиболее явно эффект выражен в предшествующие подъему годы минимума: противоположные отклонения индекса асимметрии для регулярных и нерегулярных АО достигают 30–40%. В 23-м цикле, начиная со второго максимума, преимущественная активность нерегулярных АО переходит в южное полушарие и наблюдается там в течение всей фазы спада. Избыточное количество АО-нарушителей в одном из полушарий (в данном случае, в южном) может объясняться дополнительным ослаблением тороидального поля в этом полушарии. Такое ослабление может быть результатом взаимодействием дипольной и квадрупольной составляющих тороидального поля: наложения силовых линий антисимметричного поля диполя и симметричного поля квадруполь вблизи экватора. Этот эффект, как и рассмотренное выше ослабление тороидального поля в ходе

цикла, может увеличивать вклад флуктуационного динамо и приводить к появлению нерегулярных АО.

Следует также обратить внимание, что активность регулярных АО на спаде цикла также преобладает в южном полушарии (рис. 3), причем ход соответствующей черной линии для них даже опережает ход серой линии для АО-нарушителей. Для 24-го цикла наблюдается картина резкого перехода активности из одного полушария в другое для обеих исследуемых категорий АО. При этом при переходах активности в северное полушарие кривые для регулярных и нерегулярных групп солнечных пятен практически синхронизированы, тогда как при каждом из переходов активности в южное полушарие ход линии для регулярных АО опережает ход кривой для АО-нарушителей. Соответствующее характерное время опережения составляет ~1.5–2 года, что практически совпадает с интервалом, разделяющим максимумы активности АО в разных полушариях в обоих исследованных циклах, как для регулярных, так и для нерегулярных АО. Данный эффект может быть связан с изменениями конфигурации исходного тороидального поля (произведенного глобальным динамо) и требует дальнейшего исследования.

### 3.2. Сравнение проявлений NS-асимметрии для регулярных/нерегулярных и простых/сложных активных областей

Достоверность описанных выше результатов, касающихся сильных проявлений NS-асимметрии в 24-м цикле, подтверждается в работе [Nikbakhsh et al., 2019]. Авторы исследовали циклические вариации АО простой ( $\alpha$  и  $\beta$ ) и сложной ( $\beta\gamma$  и  $\beta\gamma\delta$ ) магнитной конфигурации по классификации MWO в период с января 1996 по декабрь 2018 гг. Методика ежедневного определения количества АО разных магнитных классов позволила авторам учитывать различную степень магнитной сложности, проявлявшуюся у АО в процессе эволюции. Аналогичные нашим графикам для регулярных и нерегулярных АО (рис. 2а и рис. 2б) временные зависимости для месячного количества АО простой (simple active regions, SARs) и сложной (complex active regions, CARs) магнитной конфигурации представлены в работе [Nikbakhsh et al., 2019] на рис. 7 (верхняя и нижняя панели, соответственно). Для сравнения с ходом цикла авторами данной работы используется число солнечных пятен Boulder Sunspot Number [Hathaway, 2015], называемое ими NSN (отображается сплошной серой заливкой). Результаты нашей работы и работы [Nikbakhsh et al., 2019] очень близки для 24-го цикла. Сравнение рис. 7 (верхняя панель) из цитируемой работы для АО простой магнитной конфигурации, SARs по терминологии авторов, и нашего рис. 2а для регуляр-

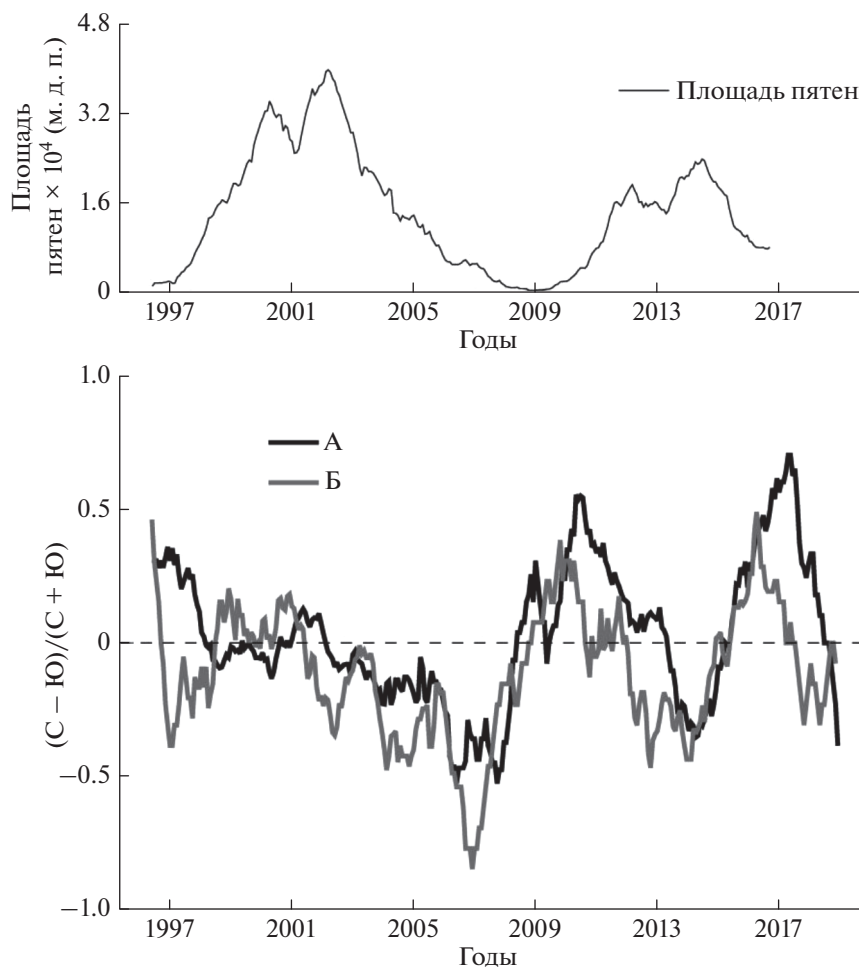


**Рис. 2.** Суммарное количество регулярных (*а*) и нерегулярных (*б*) групп солнечных пятен в северном (сплошные толстые черные линии) и южном (прерывистые толстые черные линии) полушариях; суммарная площадь солнечных пятен (тонкие черные линии); способ сглаживания всех кривых тот же (см. подпись к рис. 1).

ных АО показывает практически идентичную картину попеременной активности северного и южного полушарий. Замеченные нами проявления сильной асимметрии (рис. 2*б* для нерегулярных АО) наблюдаются также и на их рис. 7 (нижняя панель) для АО сложной магнитной конфигурации (CARs). Причем относительная величина пика для АО во втором максимуме цикла в южном полушарии для CARs даже больше,

чем для исследованных нами нерегулярных АО; наблюдаемое во втором максимуме количество сложных АО в южном полушарии превышает количество АО в разных полушариях в 23-м, более сильном цикле.

Однако в результатах, полученных в обеих работах для регулярных/нерегулярных и простых/сложных АО 23-го цикла, наблюдаются расхождения. Наши коллеги не наблюдали существенной



**Рис. 3.** Индекс асимметрии (нижняя панель) для регулярных (черная линия) и нерегулярных АО (серая линия); суммарная площадь солнечных пятен (верхняя панель); способ сглаживания всех кривых тот же (см. подпись к рис. 1).

разницы в распределении АО обоих исследованных типов по полушариям в двух максимумах цикла. По их данным простые АО в разных полушариях распределены между максимумами равномерно, тогда как сложные АО в обоих полушариях преобладают во втором максимуме цикла. На наших же графиках (рис. 2а и 2б) для регулярных/нерегулярных АО отчетливо видны проявления попеременной активности двух полушарий, причем порядок срабатывания полушарий изменяется от цикла к циклу и различается для разных категорий исследованных АО. Причина данного расхождения в полученных результатах заключается, по-видимому, в разнице использованных методик. Мы соотносили действие глобального динамо с регулярными АО, удовлетворяющими непосредственно основным эмпирическим закономерностям [van Driel-Gesztelyi and Green, 2015], лежащим в основе классических моделей магнитного цикла [Babcock, 1961; Leighton, 1964; Parker, 1955] и теории динамо среднего поля [Moffat, 1978; Krause and Rädler, 1980]. Нарушения этих за-

кономерностей у нерегулярных групп солнечных пятен мы соотносили с влиянием флуктуационного (мелкомасштабного, турбулентного) динамо [Казанцев, 1967; Zeldovich et al., 1990; Brandenburg and Subramanian, 2005]. Наши коллеги связывают действие глобального и мелкомасштабного динамо с АО простой и сложной магнитной конфигурации [Nikbakhsh et al., 2019], соответственно, и эта взаимосвязь, безусловно, присутствует. Однако следует отметить, что магнитная конфигурация обычных произведенных глобальным динамо регулярных АО может усложняться в силу разных причин, не связанных с флуктуационным динамо. Например, при очень тесном взаимном расположении АО в максимумах цикла, когда весьма затруднительно провести четкую границу между соседними группами солнечных пятен. Известно также, что частое появление АО на активных долготах [van Driel-Gesztelyi and Green, 2015] может приводить к тому, что произведенный глобальным динамо новый поток последовательно всплывает в границах еще существующих старых АО; такие



группы солнечных пятен также приобретают сложную магнитную конфигурацию. Степень магнитной сложности АО растет также из-за процессов, происходящих при распаде крупных старых пятен, когда в окружающих такие пятна ровячейках (в англоязычной литературе принят термин “moatcells”) появляются множественные мелкие пятна/поры разной полярности (см., например, [Ryutova, 2018]), и других. Таких АО, произведенных глобальным динамо, но обладающих повышенной степенью сложности магнитной конфигурации, достаточно много. Мы относим их к регулярным группам солнечных пятен категории A, а согласно методике, применяемой в работе [Nikbakhsh et al., 2019], они относятся к АО сложной магнитной конфигурации. С другой стороны, многие АО, на процесс всплытия которых, по-видимому, оказывало действие флуктуационное динамо, имеют на протяжении всей эволюции простую биполярную структуру. О влиянии турбулентности в конвективной зоне на магнитные трубки таких групп солнечных пятен могут свидетельствовать нарушенный угол наклона оси биполярной АО, обратная полярность лидера, неправильное соотношение между площадями лидирующего/хвостового пятен и другие признаки. Отдельный случай представляют одиночные пятна (простая магнитная конфигурация по определению). Как правило, они являются остатками лидирующих пятен регулярных АО, поэтому при анализе должны рассматриваться вместе с ними. Однако существуют одиночные пятна, сохранившиеся в результате распада АО с обратной полярностью и АО с преобладанием хвостового пятна. Такие АО, несмотря на простую магнитную конфигурацию, вполне могут быть соотнесены с вмешательством флуктуационного динамо и должны рассматриваться вместе с другими АО-нарушителями. По-видимому, применение ММК открывает новые возможности распределения АО по категориям и позволяет выявлять достаточно тонкие эффекты, связанные с асимметрией полушарий относительно экватора и конкурентным взаимодействием глобально и флуктуационного динамо.

Отметим, что сравнительный анализ данных, полученных в результате применения обоих рассмотренных подходов, позволяет подтвердить вывод о связи между усилением/ослаблением произведенного глобальным динамо тороидального поля, с одной стороны, и проявлениями NS-асимметрии и количеством нерегулярных АО и АО сложной магнитной конфигурации, с другой стороны. Хорошее совпадение результатов, полученных по двум методиками, в 24-м цикле и их различие в 23-м цикле можно объяснить разницей в интенсивности циклов. Действительно, поочередное проявление активности АО северного и южного полушарий в двух максимумах

цикла хорошо заметно в 24-м (слабом) цикле и проявлено примерно одинаково как для регулярных АО (рис. 2а), так и для АО простой магнитной конфигурации (рис. 7 из работы [Nikbakhsh et al., 2019], верхняя панель). В 23-м цикле для регулярных АО относительная величина пиков существенно меньше, а для простых АО разницы между пиками практически нет. Таким образом, чем сильнее произведенное глобальным динамо тороидальное поле, тем сложнее обнаружить проявления NS-асимметрии на масштабах АО и судить о воздействии флуктуационного динамо. Отметим также, что оба подхода свидетельствуют о повышенной активности нерегулярных АО (рис. 2б) и АО со сложной магнитной конфигурацией (рис. 7 из работы [Nikbakhsh et al., 2019], нижняя панель) во втором максимуме обоих исследованных циклов в южном полушарии, что повышает достоверность научного результата, полученного разными методами.

#### 4. ВЫВОДЫ

Нами было изучено 2046 АО 23-го и 1507 АО 24-го солнечных циклов, появившихся на видимой поверхности диска Солнца в период с мая 1996 по декабрь 2018 гг. Мы провели также сравнение с результатами работы [Nikbakhsh et al., 2019], полученными для 4797 групп солнечных пятен 23-го и 24-го циклов, имеющих простую и сложную магнитную конфигурацию (по классификации MWO). На основании проведенного исследования мы можем заключить следующее.

Основной вклад в развитие цикла вносят регулярные АО, что полностью согласуется с классическими моделями магнитного цикла [Babcock, 1961; Leighton, 1964]; вклад нерегулярных АО примерно в 2–5 раз меньше в максимумах цикла и сопоставим в минимумах цикла. Сопоставимость вкладов регулярных и нерегулярных АО может объясняться совместным действием глобального динамо среднего поля (отвечающего за производство магнитных трубок АО) и флуктуационного динамо (вмешивающегося в процесс их всплытия сквозь конвективную зону), что согласуется с работами [Sokoloff et al., 2015; Abramenko et al., 2018; Nikbakhsh et al., 2019].

Ослабление произведенного глобальным динамо тороидального поля в ходе цикла и соответственный рост вклада флуктуационного (мелкомасштабного) динамо может служить причиной увеличения количества нерегулярных АО во втором максимуме солнечного цикла. Эффект проявляется также для АО сложной магнитной конфигурации и обнаружен в обоих исследованных циклах.

Повышенная активность южного полушария во втором максимуме обоих циклов, выражающая

яся в увеличении количества нерегулярных АО и АО сложной магнитной конфигурации, может объясняться ослаблением тороидального поля вследствие взаимодействия его дипольной и квадрупольной составляющих. Наложение антисимметричного поля диполя и симметричного поля квадрупольно вблизи экватора приводит к усилению тороидального поля в одном, и ослаблению – в другом полушарии. Это также увеличивает роль флуктуационного динамо в их конкурентном взаимодействии с глобальным динамо.

Исследования индекса асимметрии для регулярных и нерегулярных АО также показали большую активность регулярных и нерегулярных АО в южном полушарии во втором максимуме и на фазе спада 23-го цикла. Для 24-го цикла наблюдается картина многократного перехода активности из одного полушария в другое для обеих исследуемых категорий АО. Сравнение кривых, отображающих временную зависимость индекса асимметрии групп солнечных пятен для регулярных и нерегулярных АО, показало, что переход активности в северное полушарие осуществляется для обеих категорий исследованных АО синхронно. При переходе активности в южное полушарие регулярные АО опережают нерегулярные АО на ~1.5–2 года; характерное время опережения близко к временному интервалу между максимумами активности регулярных и нерегулярных АО в разных полушариях.

Применение магнито-морфологической классификации и распределение АО по категориям непосредственно в соответствии с закономерностями теории динамо среднего поля позволило выявить более тонкие проявления NS-асимметрии. Поочередная активность северного и южного полушария обнаружена и в 23-м, и в 24-м циклах; очередность срабатывания полушарий изменяется от цикла к циклу; она также различается для регулярных и нерегулярных АО.

Сравнение циклических вариаций регулярных/нерегулярных АО и АО, распределенных на группы в соответствии со степенью сложности их магнитной конфигурации (по классификации MWO) [Nikbakhsh et al., 2019], в разных полушариях показало, что возможность обнаружения проявлений NS-асимметрии на масштабах АО связана с усилением/ослаблением тороидального поля. Обнаружено, что относительная величина пиков для регулярных АО и АО простой магнитной конфигурации достаточно велика в слабом 24-м цикле; она существенно меньше для регулярных АО и практически неразличима для АО простой магнитной конфигурации в более сильном 23-м цикле. Таким образом, чем сильнее произведенное глобальным динамо тороидальное поле, тем сложнее обнаружить проявления

NS-асимметрии и судить о воздействии флуктуационного динамо.

## 5. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность коллегам, опубликовавшим работу [Nikbakhsh et al., 2019], за возможность сравнения наших результатов, что позволило обоюдно повысить достоверность научных выводов.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа А.Ж. по классификации активных областей (АО) 23-го и 24-го циклов выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект 18-12-00131). Работа В.А. проведена в рамках научно-исследовательской работы НИР № 0831-2019-0006 МОН РФ. Работа Д.С. выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта № 18-02-00085. Работа А.Х. выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований гранты № 18-02-00085 и № 19-52-45002, в рамках базового финансирования программы ФНИ И.16.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Казанцев А.П.* Об усилении магнитного поля проводящей жидкостью // *ЖЭТФ.* Т. 53. С. 1806–1813. 1967.
- *Abramenko V.I., Zhukova A.V., Kutsenko A.S.* Contributions from Different-Type Active Regions Into the Total Solar Unsigned Magnetic Flux // *Geomagn. Aeronomy.* V. 58. № 8. P. 1159–1169. 2018.
- *Babcock H.W.* The Topology of the Sun's Magnetic Field and the 22-YEAR Cycle // *Astrophys. J.* V. 133. P. 572–587. 1961.
- *Baranyi T., Gyori L., Ludmany A.* On-line Tools for Solar Data Compiled at the Debrecen Observatory and their Extensions with the Greenwich Sunspot Data // *Solar Phys.* V. 291. P. 3081–3102. 2016.
- *Bertello L., Pevitsov A., Tlatov A. et al.* Correlation Between Sunspot Number and Ca II K Emission Index // *Solar Phys.* V. 291. P. 2967–2979. 2016.
- *Brandenburg A., Sokoloff D., Subramanian K.* Current status of turbulent dynamo theory. From large-scale to small-scale dynamos // *Space Sci. Rev.* V. 169. P. 123–157. 2012.
- *Brandenburg A., Subramanian K.* Astrophysical magnetic fields and nonlinear dynamo theory // *Phys. Rep.* V. 417. P. 1–209. 2005.
- *D'Silva S., Choudhuri A.R.* A theoretical model for tilts of bipolar magnetic regions // *Astron. Astrophys.* V. 272. P. 621–633. 1993.
- *Grottrian W., Künzel H.* Über den Induktionsfluß durch die Sonnenflecken. Mit 12 Textabbildungen // *Z. Astrophys.* V. 28. P. 28–42. 1950.
- *Egorova T., Schmutz W., Rozanov E. et al.* Revised historical solar irradiance forcing // *Astron. Astrophys.* V. 615. id.A85. 2018.

- *Fan Y., Fisher G.H.* Radiative Heating and the Buoyant Rise of Magnetic Flux Tubes in the Solar interior // *Solar Phys.* V. 166. P. 17–41. 1996.
- *Fisher G.H., Fan Y., Howard R.F.* Comparisons between Theory and Observation of Active Region Tilts // *Astrophys. J.* V. 438. P. 463–471. 1995.
- *Hale G.E., Ellerman F., Nicholson S.B. et al.* The Magnetic Polarity of Sun-Spots // *Astrophys. J.* V. 49. P. 153. 1919.
- *Hale G.E., Nicholson S.B.* The Law of Sun-Spot Polarity // *Astrophys. J.* V. 62. P. 270. 1925.
- *Hale G.E., Nicholson S.B.* Magnetic Observations of Sunspots 1917–1924. Part I. Washington D.C.: Carnegie Inst. Washington. 1938.
- *Hathaway D.H.* The Solar Cycle // *Living Rev. Solar Phys.* V. 12. article id. 4. 2015.
- *Hoyt D.V., Schatten K.H.* Group sunspot numbers: a new solar activity reconstruction // *Solar Phys.* V. 179. P. 189–219. 1998a.
- *Hoyt D.V., Schatten K.H.* Group sunspot numbers: a new solar activity reconstruction // *Solar Phys.* V. 181. P. 491–512. 1998b.
- *Jaeggli S.A., Norton A.A.* The magnetic classification of solar active regions 1992–2015 // *Astrophys. J. Lett.* V. 820. article id. L11–L15. 2016.
- *Kitchatinov L.L.* The solar dynamo: inferences from observations and modeling // *Geomagn. Aeronomy.* V. 54. № 7. P. 867–876. 2014.
- *Krause F., Rädler K.-H.* Mean-Field Magnetohydrodynamics and Dynamo Theory. Oxford: Pergamon Press, 271 p. 1980.
- *Leighton R.B.* Transport of magnetic fields on the Sun // *Astrophys. J.* V. 140. P. 1547–1564. 1964.
- *Lemen J.R., Title A.M., Akin D.J.* The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO) // *Solar Phys.* V. 275. P. 17–40. 2012.
- *Li J., Ulrich R.K.* Long-term Measurements of Sunspot Magnetic Tilt Angles // *Astrophys. J.* V. 758. article id. 115. 2012.
- *Li J.A.* Systematic Study of Hale and Anti-Hale Sunspot Physical Parameters // *Astrophys. J.* V. 867. article id. 89. 2018.
- *Maunder E.W.* Prof. Spoerer’s researches on Sun-spots // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* V. 50. P. 251–252. 1890.
- *Maunder E.W.* Note on the distribution of sun-spots in heliographic latitude, 1874–1902 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* V. 64 P. 747–761. 1904.
- *Mazumder R.* Properties of filaments in solar cycle 20–23 from McIntosh Archive 2019 // *Res. Astron. Astrophys.* V. 19. article id. 080. 2019.
- *McClintock B.H., Norton A.A.* Recovering Joy’s Law as a Function of Solar Cycle, Hemisphere, and Longitude // *Solar Phys.* V. 287. P. 215–227. 2013.
- *McClintock B.H., Norton A.A., Li J.* Re-examining sunspot tilt angle to include anti-hale statistics // *Astrophys. J.* V. 797. article id 130. 2014.
- *Miesch M.S.* The solar dynamo // *Philos. T. R. Lond.* V. 370. P. 3049–3069. 2012.
- *Moffat H.K.* Magnetic Field Generation in Electrically Conducting Fluids. Cambridge: Cambridge University Press, 343 p. 1978.
- *Moses D., Clette F., Delaboudinière J.-P. et al.* EIT Observations of the Extreme Ultraviolet Sun // *Solar Phys.* V. 175. P. 571–599. 1997.
- *Nagovitsyn Y.A., Tlatov A.G., Nagovitsyna E.Y.* The Area and Absolute Magnetic Flux of Sunspots Over the Past 400 Years // *Astron. Rep.* V. 60. № 9. P. 831–838. 2016.
- *Nikbaksh S., Tanskanen E.I., Käpylä M.J. et al.* Differences in the solar cycle variability of simple and complex active regions during 1996–2018 // *Astron. Astrophys.* V. 629. id.A45. 2019.
- *Obridko V.N., Sokoloff D.D., Kuzanyan K.M. et al.* Solar cycle according to mean magnetic field data // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* V. 365. P. 827–832. 2006.
- *Parker E.N.* Hydromagnetic Dynamo Models // *Astrophys. J.* V. 122 P. 293–314. 1955.
- *Pevtsov A.A., Bertello L., Tlatov A.G. et al.* Cyclic and Long-Term Variation of Sunspot Magnetic Fields // *Solar Phys.* V. 289. P. 593–602. 2014.
- *Rädler K.-H., Kleeorin N., Rogachevskii I.* The Mean Electromotive Force for MHD Turbulence: The Case of a Weak Mean Magnetic Field and Slow Rotation // *Geophys. Astro. Fluid.* V. 97. P. 249–274. 2003.
- *Richardson R.S.* Sunspot groups of irregular magnetic polarity // *Astrophys. J.* V. 107. P. 78–93. 1948.
- *Ryutova M.* Moving Magnetic Features (MMFs) / *Physics of Magnetic Flux Tubes / Astrophysics and Space Science Library*, 455. Cham, Switzerland: Springer, P. 287–321. 2018.
- *Sammis I., Tang F., Zirin H.* The Dependence of Large Flare Occurrence on the Magnetic Structure of Sunspots // *Astrophys. J.* V. 540. P. 583–587. 2000.
- *Scherrer P.H., Bogart R.S., Bush R.I. et al.* The Solar Oscillations Investigation – Michelson Doppler Imager // *Solar Phys.* V. 162. P. 129–188. 1995.
- *Scherrer P.H., Schou J., Bush R.I. et al.* The Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) Investigation for the Solar Dynamics Observatory (SDO) // *Solar Phys.* V. 275. P. 207–227. 2012.
- *Schwabe M.* Sonnen-Beobachtungen im Jahre 1843 // *Astron. Nachr.* V. 21. P. 233. 1844.
- *Smith S.F., Howard R.* Magnetic Classification of Active Regions / *Proc. IAU Symposium № 35.* Budapest, Hungary, 4–8 September 1967. P. 33–42. 1968.
- *Sokoloff D., Khlystova A.I.* The solar dynamo in the light of the distribution of various sunspot magnetic classes over butterfly diagram // *Astron. Nachr.* V. 331. P. 82–87. 2010.
- *Sokoloff D., Khlystova A.I., Abramenko V.I.* Solar small-scale dynamo and polarity of sunspot groups // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* V. 451. P. 1522–1527. 2015.
- *Spörer F.W.G.* Heliographische Vertheilung der Sonnenflecken // *Astron. Nachr.* V. 63. P. 71–76. 1865.
- *Stenflo J.O., Kosovichev A.G.* Bipolar magnetic regions on the Sun: Global analysis of the SOHO/MDI data set // *Astrophys. J.* V. 745. article id. 129. 2012.
- *Sur S., Brandenburg A., Subramanian K.* Kinematic  $\alpha$ -effect in isotropic turbulence simulations // *Mon. Not. R. Astron. Soc. Letters.* V. 385. P. L15–L19. 2008.
- *Ternullo M., Contarino L., Romano P. et al.* A statistical analysis of sunspot groups hosting M and X flares // *Astron. Nachr.* V. 327. P.36–43. 2006.

- *Tlatova K., Tlatov A., Pevtsov A. et al.* Tilt of Sunspot Bipoles in Solar Cycles 15 to 24 // *Solar Phys.* V. 293. P. 118–130. 2018.
- *Tsuneta S., Ichimoto K., Katsukawa Y. et al.* The Solar Optical Telescope for the Hinode Mission: An Overview // *Solar Phys.* V. 249. P. 167–196. 2008.
- *van Driel-Gesztelyi L., Green L.M.* Evolution of active regions // *Living Rev. Solar Phys.* V. 12. article id. 1. 2015.
- *Wang Y.M., Sheeley N.R.* Average properties of bipolar magnetic regions during sunspot cycle 21 // *Solar Phys.* V. 124. P. 81–100. 1989.
- *Wolf R.* Sonnenflecken-Beobachtungen in der zweiten Hälfte des Jahres 1850 // *Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Bern.* V. 207. P. 89–95. 1851.
- *Wolf R.* Mitteilungen über die Sonnenflecken. I // *Astronomische Mitteilungen der Eidgenössischen Sternwarte Zürich.* V. 1. P. 3–13. 1856.
- *Wolf R.* On the Solar Spots // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* V. 17. P. 252. 1857.
- *Zeldovich Y.B., Ruzmaikin A.A., Sokoloff D.D.* The almighty chance. *World Scientific Lecture Notes in Physics*, 20. Singapore: World Scientific Publication, 328 p. 1990.
- *Zhukova A.V., Abramenko V.I., Kutsenko A.S.* Time variations of the total unsigned magnetic flux of active regions during the solar cycle 24 // *Astron. Astrophys. Trans.* V. 31. P. 75–88. 2019.