

УДК 523.9-1/-8, 523.9-466, 523-982

Каталог активных областей 24-го цикла

А.В. Жукова

ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, Крым, 298409
anastasiya.v.zhukova@gmail.com

Поступила в редакцию 21 июня 2018 г.

Аннотация. При помощи данных инструмента HMI, установленного на борту орбитальной обсерватории SDO, рассчитан магнитный поток от АО, находящихся на видимой солнечной поверхности в период с 2010 по 2017 гг. Области распределены по категориям по принципу соответствия теории глобального динамо среднего поля: А – правильные биполярные области; U – одиночные пятна; В – биполярные области с отклонениями от одной из основных закономерностей теории динамо (либо закона полярностей Хейла, либо закона Джоя, либо с лидирующим пятном, меньшим, чем основное последующее пятно). Группа В разбита, в свою очередь, на соответствующие подмножества. Всего изучено 1684 АО с потоком не менее 10^{20} Мх. Составлен каталог, содержащий для каждой АО вычисленный нами магнитный поток, установленную категорию и другие данные. Каталог может быть использован для изучения изменений магнитного потока от АО выделенных категорий с солнечным циклом. На его основе могут быть проведены исследования соотношения между глобальным динамо среднего поля и мелкомасштабным турбулентным динамо для выяснения источников генерации магнитного поля Солнца.

A CATALOG OF ACTIVE REGIONS OF THE 24TH SOLAR CYCLE, *by A.V. Zhukova*. Data set acquired by HMI/SDO allowed us to calculate a magnetic flux from active regions on the visible surface of the Sun during 2010–2017. We classified ARs into three categories: A-type – regular bipolar ARs; U-type – unipolar spots; B-type – irregular ARs, violating mean-field dynamo rules (either Hale’s polarity law or Joy’s law or having the leading spot less than the main following spot). The B-type ARs, in turn, were segregated into three relevant subcategories. In total, 1684 ARs with the unsigned magnetic flux above 10^{20} Mx were detected. A catalog of ARs was compiled, which contains the total (unsigned) magnetic flux of an AR, its category, and other data. The catalog can be used to study changes of the magnetic flux from the categories of ARs with cycle. It also might be used as a base for investigations of the connection between the global mean-field and the turbulent small-scale dynamos.

Ключевые слова: Солнце: магнитные поля, Солнце: активные области

1 Введение

Видимым проявлением всплывающего магнитного потока на поверхности Солнца являются активные области (АО). Изучение таких областей позволяет судить о глубинных процессах, лежащих в основе солнечной активности. Для непосредственной оценки продуктивности солнечного динамо необходимы исследования эволюции и статистики магнитного потока от АО на основе длительных однородных

рядов наблюдений. Новые возможности для статистических исследований в области генерации солнечных магнитных полей открылись с появлением высокоточных инструментов, расположенных на борту космических обсерваторий, таких как Solar Dynamics Observatory (SDO) (Шоу и др., 2012). Данные, полученные с помощью таких инструментов, находятся в свободном доступе на интернет-ресурсах, но большинство из них представляет собой так называемые “сырые” данные, прошедшие только самую необходимую предварительную обработку. Для использования в научных исследованиях необходима дополнительная, более тщательная обработка таких данных, а также их упорядочивание и классификация.

Мы поставили перед собой задачу получить, обработать, свести воедино и структурировать данные по магнитному потоку от АО, находящихся на видимой поверхности Солнца в период с июня 2010 по начало 2018 гг. Для получения необходимого нам непрерывного ряда мы воспользовались данными инструмента Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) (Шерпер и др., 2012; Лиу и др., 2012), установленного на борту орбитальной обсерватории SDO. Из 3113 полученных и изученных участков магнитограмм полного диска были отобраны 1684 АО, прошедшие предварительный отбор по описанным ниже критериям. Для каждой из отобранных областей был вычислен магнитный поток и установлена надлежащая категория. АО были классифицированы нами в соответствии с возможностью или невозможностью отнесения их происхождения к действию глобального динамо среднего поля. Все множество изученных АО было распределено следующим образом: А – АО, для которых неукоснительно выполняются закономерности теории динамо среднего поля; В – биполярные/многополярные АО с одним или несколькими отклонениями от закономерностей динамо среднего поля (т. е. с нарушением закона полярностей Хейла, закона угла наклона Джоя или правила о соотношении площадей пятен лидирующей и последующей полярностей); U – одиночные пятна.

Целью настоящей работы было составление каталога, содержащего вычисленный нами магнитный поток от АО, установленную категорию и все необходимые технические данные. Такой каталог, охватывающий фазы нарастания, кульминации и угасания почти полного 11-летнего цикла солнечной активности, позволяет проводить исследования изменений магнитного потока и других величин с циклом, что может послужить основой для выявления соотношения между глобальным динамо среднего поля и другими источниками генерации магнитного поля Солнца.

2 Данные

2.1 Ряды наблюдений

Для настоящей работы мы получали данные инструмента HMI/SDO с сайта Стэнфордского объединенного научного операционного центра – Joint Science Operations Center (JSOC)¹. Для наблюдений на этом инструменте используется спектральная линия железа Fe I 6173 Å, формирующаяся в фотосфере (Нортон и др., 2006). Инструмент представляет собой фильтрограф и позволяет получать как изображения Солнца в интегральном свете, так и доплерограммы и векторные магнитограммы полного диска Солнца размером 4096 × 4096 пикселей. Величина пикселя составляет 0.5", пространственное разрешение – 1", временное разрешение – 720 с.

Мы задействовали выделенные участки магнитограмм полного диска с активными областями – Spaceweather HMI Active Region Patches (SHARPs) – серии sharp_cea_720s, полученные в период с июня 2010 г. по декабрь 2017 г. А именно, два из 11 сегментов серии: магнитограммы (magnetogram) и интенсивность в белом свете (continuum). Первый из них представляет собой карты компоненты магнитного поля вдоль луча зрения, второй содержит данные по интенсивности в белом свете. Для участков SHARP проведено преобразование изображения из гелиопроективных декартовых координат для ПЗС-изображений (helio-projective Cartesian CCD image coordinates) с использованием гелиографической цилиндрической проекции равной площади – heliographic Cylindrical Equal-Area (CEA) projection – с центрированием на участке SHARP (Бобра и др., 2014). Представленные в соответствии с новой проекцией данные по-прежнему являются картами компоненты плотности магнитного поля вдоль луча зрения относительно HMI.

¹ <http://jsoc.stanford.edu>

Нами использовались оба типа данных, представленных в серии sharp_cea_720s: “definitive-data” (DD) и “near real time” (NRT). К отобранным вначале данным серии NRT, полученным в период с января 2014 г. по июнь 2017 г., нами были добавлены данные серии DD за весь период исследования. Основное различие между типами данных заключается в том, что в участках серии DD содержится информация, полученная в течение всего последовательного развития АО (Хексма и др., 2014). Форма и размеры всех участков SHARP, содержащих ту или иную область из серии DD, такие же, как для момента максимального ее развития (наибольшей величины) в процессе эволюции. Участки серии NRT по форме и размерам соответствуют содержащейся в них АО в момент получения изображения. Другие различия в типах обычно малы и локализованы; разница в значениях беззнакового магнитного потока, вычисленных по обеим сериям, составляет, как правило, около 2 %.

В проводимом исследовании мы пользовались также данными о ежедневном количестве солнечных пятен (числах Вольфа). Эти данные были получены на сайте Королевской бельгийской обсерватории в Брюсселе (Royal Observatory of Belgium, Brussels)².

В соответствии с поставленной задачей нами был создан небольшой пакет программ в среде IDL, позволяющий получать данные инструмента HMI/SDO в автоматическом режиме и осуществлять необходимую их обработку. Для получения непрерывной последовательности данных для расчета общего (беззнакового) магнитного потока от АО на видимой поверхности Солнца в течение рассматриваемого промежутка времени мы определили для моментов наблюдения периодичность в 9 дней. Это соответствует трем моментам за синодический период вращения Солнца (приблизительно 27.28 дня на средней широте пятен, составляющей порядка 16°). Для первоначальной обработки нами задействовались все доступные в используемой серии участки SHARP с АО в одно и то же время (05:24:00) в каждый день наблюдений (начиная с 7 июня 2010 г.). Мы выбрали данное время суток, поскольку в этот момент отклонения при определении магнитных полей для инструмента HMI (искусственный 24-часовой цикл), возникающие из-за орбитального движения спутника, сводятся к нулю (Куценко, Абраменко, 2016). Таким образом, моменты наблюдений наступали в указанное время каждый девятый календарный день.

После получения данных при сопоставлении номеров АО полученных участков SHARP с визуальными наблюдениями на сайтах www.heliviewer.org и www.solarmonitor.org мы обнаружили, что в нашей базе отсутствуют участки SHARP, содержащие некоторые довольно крупные АО. На несколько дней наблюдений отсутствовали вообще какие-либо данные. Чтобы не лишиться впоследствии потокового вклада от областей, пропущенных в обеих используемых нами сериях (DD или NRT), мы вручную проводили поиск по индивидуальному номеру Национального управления океанических и атмосферных исследований США – National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Для каждой АО мы искали в обеих сериях участки SHARP, созданные во время, ближайшее к моменту наблюдений (разница составляла обычно до 2 дней). Поэтому некоторые АО, вошедшие в каталог, имеют дату и время записи, отличные от выбранных нами стандартных моментов наблюдения (но близкие к ним). Всего нами было рассмотрено 3113 участков SHARP для каждого из задействованных сегментов серии sharp_cea_720s.

Общий магнитный поток на поверхности Солнца и количество активных областей в периоды максимумов и минимумов цикла солнечной активности существенно различаются. Поэтому критерий, по которому участки SHARP с отдельными областями могут быть выделены из магнитограмм полного диска в максимумах и в минимумах, строго говоря, должен быть различным. Подбор единого критерия для всего цикла, необходимого при автоматической обработке данных, представляет собой сложную задачу. В силу этого некоторые участки SHARP, предоставляемые центром JSOC (большинство – в период высокой солнечной активности в максимуме цикла), содержат по несколько АО. Для корректного исследования и для создания однородного ряда данных мы выделяли из таких участков все самостоятельные области и записывали данные по каждой из них отдельно. Для достижения большего единообразия исследуемого материала мы сужали также границы участков серии DD, чтобы исключить содержащиеся в них слишком большие зоны невозмущенного Солнца.

² <http://www.sidc.be>

Для вычисления общего магнитного потока данные магнитограмм для компоненты магнитного поля вдоль луча зрения V_{LOS} были преобразованы в данные для радиальной компоненты V_R посредством деления на μ , косинус угла между нормалью к солнечной поверхности и лучом зрения по отношению к наблюдателю. Для участков, у которых центры тяжести по потоку – flux-weight center – попадают в зону вблизи лимба (долготы более 70°), косинус гелиоцентрического угла μ мал, а погрешности вычисления магнитного потока велики. Такие АО были исключены нами из рассмотрения. В процессе первичной обработки данных каждого из участков SHARP мы задействовали только пиксели со значениями больше 12 Гс, считая, что меньшие значения близки к шумовому порогу. Чтобы устранить влияние на расчеты дефектов, присутствующих в некоторых магнитограммах, мы заменили значения NaN пикселей на ноль. В соответствии с общепринятым для АО критерием (ван Дриель-Гештелей, Грин, 2015), мы отбирали для последующего исследования только участки SHARP, содержащие области с рассчитанным нами общим потоком, равным и более 10^{20} Мх. Всего для дальнейшего анализа нами было использовано 1684 участка SHARP, содержащих АО.

2.2 Распределение областей по категориям

Для каждой АО был определен ее класс: А – “правильные” биполярные области, удовлетворяющие закономерностям динамо среднего поля; В – “неправильные” биполярные (многополярные) области, для которых хотя бы один из основных законов нарушен; U – одиночные пятна. К основным законам, которым должна подчиняться область категории А, относятся экспериментально установленные правила для последовательности всплытия групп солнечных пятен, сохраняющиеся в течение 11/22-летних циклов (ван Дриель-Гештелей, Грин, 2015): закон полярности Хейла и угла наклона Джоя. Мы также считали, что “правильные” области должны соответствовать правилу о соотношении площадей лидирующего и последующего пятен, впервые сформулированному Гротрианом (Гротриан, Кюнцель, 1950).

Из закона Хейла следует, что биполярные АО, расположенные приблизительно вдоль В–З направления, имеют в качестве лидирующих противоположные (по ходу вращения Солнца) магнитные полярности в С и Ю полусферах; полярности изменяются с каждым последующим 11-летним циклом солнечной активности. В текущем 24-м цикле для выделенной нами категории областей А в С полушарии лидирующей является отрицательная полярность, а в Ю – положительная.

Согласно закону Джоя, существует систематическое отклонение от приблизительного расположения АО вдоль В–З направления: лидирующие пятна расположены ближе к экватору. Угол отклонения линии, соединяющей полярности, от экватора имеет широтную зависимость и может быть представлен подобранной аналитической функцией (Стенфло, Косовичев, 2012)

$$\gamma = \gamma_0 \sin b, \quad (1)$$

где b – гелиографическая широта, а амплитуда угла наклона $\gamma_0 \approx 32.1^\circ$ – подогнанный свободный параметр. В соответствии с этим мы считали, что угол наклона “правильных” областей из категории А должен находиться в пределах

$$0 \leq \gamma \leq 20.63^\circ. \quad (2)$$

Еще на стадии всплытия магнитный поток лидирующей полярности имеет тенденцию к стягиванию в пору, в то время как поток последующей полярности менее компактен (Лайтс и др., 1998). Полярности при всплытии расходятся асимметрично: из-за вращения Солнца лидирующее пятно движется быстрее (в западном направлении), нежели последующее (в восточном направлении); линия инверсии находится статистически ближе к последующей полярности (ван Дриель-Гештелей, Грин, 2015). Известно также, что лидирующее пятно обычно больше и живет дольше, чем последующее. Гротриан и Кюнцель сформулировали правило, согласно которому значение отношения эффективного потока лидирующего и последующего пятен составляет порядка 3:1 (Гротриан, Кюнцель, 1950). Можно попытаться, что на всех стадиях существования АО, вплоть до распада, магнитный поток лидирующего пятна сильнее, визуально оно крупнее и лучше сформировано, имеет более четкую и яркую

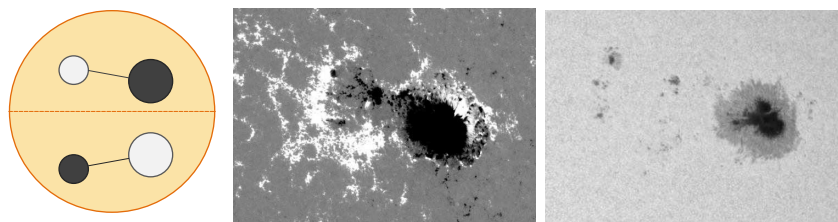


Рис. 1. АО NOAA 12529, отнесенная к категории А – “правильных” в 24-м цикле областей в С полушарии (слева направо): схема, magnetogram, continuum

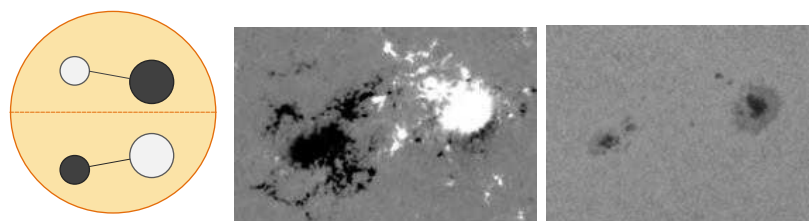


Рис. 2. АО NOAA 12119, отнесенная к категории А – “правильных” в 24-м цикле областей в Ю полушарии (слева направо): схема, magnetogram, continuum

полутень, живет дольше, чем последующее. Правило, установленное Гротрианом, послужило для нас третьим критерием для определения принадлежности АО к категории А. Примеры “правильных” областей, расположенных в С и Ю полушариях, представлены на рис. 1 и 2.

От точности распределения областей по категориям зависит надежность будущих выводов о том, какой внутренний процесс доминирует при генерации данной АО и оказывает на ее жизнь впоследствии наиболее существенное влияние; это ключевой момент данного исследования. Мгновенная картина жизни области, зафиксированная на участке, не всегда полноценно отражает состояние, наиболее характерное для той или иной АО (в котором она пребывала подавляющее время своего существования). Поэтому, чтобы определить, удовлетворяет ли каждая изучаемая область сформулированным выше законам и правилам, мы визуальнo сравнивали участки из сегмента magnetogram с соответствующими изображениями из сегмента continuum. Мы сопоставляли их также с видами изучаемой области в течение всего времени ее жизни на изображениях полного диска, размещенных на сайтах www.helioviewer.org и www.solarmonitor.org. Мы пользовались также имеющимися на этих интернет-ресурсах изображениями полного диска Солнца в свете линий Fe IX/X 171 Å, 193 Å, полученными на инструменте SDO/AIA, позволяющими установить наличие так называемых петельных связей (наблюдаемых в виде арок силовых линий магнитного поля) между полярностями в различных слоях фотосферы. Мы задействовали также магнитограммы полного диска Всемирной сетевой группы – the Global Oscillation Network Group (GONG), полученные нами на сайте солнечной обсерватории Big Bear Solar Observatory (BBSO)³.

Для распределения областей по категориям в процессе обработки данных для каждого участка SHARP мы определили признаки, согласующиеся с определенными выше закономерностями. Мы назвали их в соответствии с законами: Hale, Joy, Leader и присвоили им для каждой области флаг Yes (Y) в случае выполнения соответствующего закона или No (N) в случае его нарушения, а также флаг Zero (0), о котором более подробно будет сказано в разделе 2.3. Если хотя бы один из законов был нарушен, то мы относили АО к категории В в целом, а также к одному из ее подмножеств: HN – области с нарушением закона полярностей Хейла (рис. 3); JN – области с нарушением закона

³ <http://www.bbso.njit.edu>

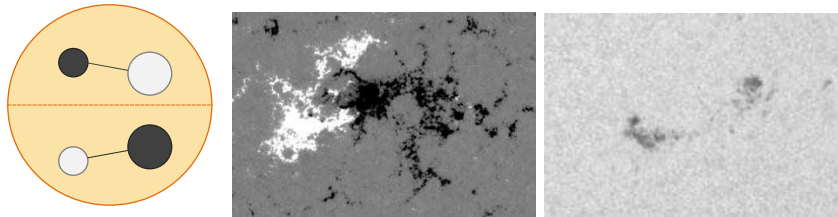


Рис. 3. АО NOAA 12401 с нарушением закона Хейла, отнесенная к подмножеству HN (слева направо): схема, magnetogram, continuum

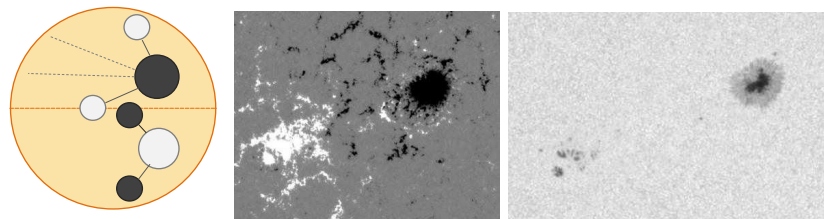


Рис. 4. АО NOAA 12135 с нарушением закона угла наклона Джоя, отнесенная к подмножеству JN (слева направо): схема, magnetogram, continuum

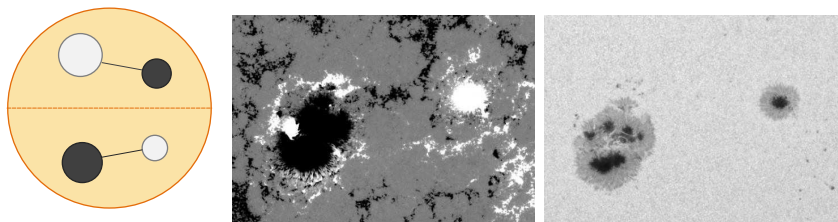


Рис. 5. АО NOAA 12209 с нарушением соотношения площадей пятен лидирующей и последующей полярностей, отнесенная к подмножеству LN (слева направо): схема, magnetogram, continuum

угла наклона Джоя (рис. 4); LN – области, у которых нарушено правило соотношения эффективных потоков (площадей) пятен лидирующей и последующей полярностей Гротриана (рис. 5).

Одиночные пятна мы относили к отдельной категории U, разделенной, в свою очередь, на два самостоятельных подмножества по принципу соответствия закону Хейла (считая, что для одиночного пятна закон должен выполняться так же, как для лидирующего пятна биполярной группы). Так, подмножество UY составили одиночные пятна с “правильной” для данного цикла полярностью (отрицательной в С полушарии и положительной в Ю), в подмножество UN вошли одиночные пятна с противоположной полярностью. В категорию U вошли также одиночные поры с небольшим магнитным потоком, до 10^{21} Мх. Пример “правильных” для 24-го цикла солнечной активности пятен приведен на рис. 6.

Нами был сформулирован также ряд вспомогательных критериев, позволяющих применять установленные законы на практике и максимально точно распределять АО по категориям. Это бывает затруднительным при изучении близко расположенных сливающихся областей, сложных многополярных областей, а также старых разрушенных АО и областей всплывающего потока. В большинстве таких случаев мы опирались не только на картину, зафиксированную на участке в момент наблюдения, но и на наиболее характерное поведение и признаки, проявляющиеся у исследуемой области в течение наиболее длительного периода за все время ее жизни.

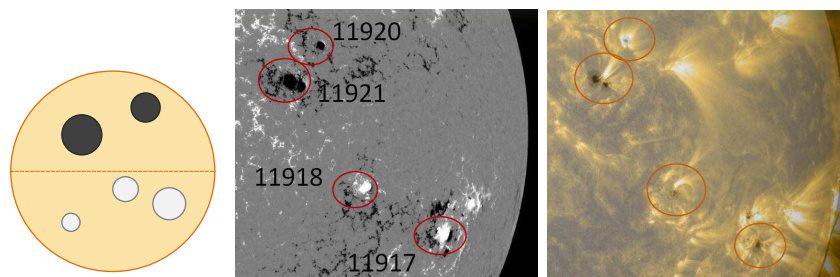


Рис. 6. АО, отнесенные к категории UY – “правильных” в 24-м цикле одиночных пятен (слева направо): схема, magnetogram, совмещенное изображение (в свете линии 171 Å и continuum)

Мы учитывали тот факт, что одиночные пятна часто являются продуктом эволюции биполярных областей (и категории А, и категории В), когда от АО остается только лидирующее пятно, в то время как последующее полностью разрушается. Процесс происходит в несколько этапов: хвостовое пятно сначала распадается на несколько более мелких, которые далее еще дробятся или уменьшаются до размера пор, а после исчезают. Последними пропадают петельные связи, соединяющие лидирующее пятно с местами, где находились ранее уже не существующие поры. Поскольку АО, как правило, определяется по наличию солнечных пятен, то в качестве критерия, позволяющего отличать старую разрушающуюся область А-типа от одиночного пятна, мы определили наличие пятен или хотя бы пор в последующей полярности.

Некоторые области состоят из одного лидирующего и нескольких пятен последующей полярности. Визуально такие АО наблюдаются как несколько диполей, раскрытых веером и имеющих основание в общем лидирующем пятне или очень тесно расположенной группе пятен. Угол наклона для таких АО мы определяли по линии, средней между линиями, соединяющими лидирующую полярность с каждой из последующих. Нами был обнаружен ряд областей, у которых в момент наблюдения угол наклона казался нарушенным. Однако тщательное изучение истории жизни таких АО показывало, что диполь с “неправильным” углом был лишь одним из нескольких существующих. Остальные трубки магнитного потока, составляющие рассматриваемую область, могли к этому моменту еще не всплыть на поверхность или уже утонуть (разрушиться), тогда как именно этот, видимый, диполь оказывался проявленным в момент наблюдений. Если угол наклона для средней линии такой области находился в установленных выше для “правильных” по данному признаку областей пределах, то мы, несмотря на картину в момент наблюдений, считали, что закон Джоя для области выполняется. Мы принимали также во внимание, что в течение первых 1–3 дней жизни АО угол ее наклона может подвергаться значительным отклонениям (ван Дриель-Гештелей, Грин, 2015; Стенфло, Косовичев, 2012). Для всплывающих областей мы считали закон Джоя нарушенным только тогда, когда отклонение угла наклона явно наблюдалось и после всплытия, в течение более или менее длительного стабильного промежутка времени существования АО.

При назначении флага для признака Leader мы учитывали, что сравнение площадей пятен лидирующей и последующей полярностей не имеет смысла для старых областей, у которых пятна в обеих полярностях сильно разрушены. Мы считали, что будет неправильным сравнивать по размерам группы пор или очень маленьких разрозненных пятен в таких областях. Поэтому все такие АО относились нами к категории “правильных” по данному признаку.

Следует отметить, что у многих “неправильных” АО наблюдалось более одного нарушения. Пример области с одновременным нарушением двух закономерностей теории динамо среднего поля – закона полярностей Хейла и закона угла наклона Джоя – представлен на рис. 7. Таким областям мы присваивали флаг N или Zго всем соответствующим этим нарушениям признакам: Hale, Joy, Leader. В результате такие АО входили во все соответствующие подмножества категории В. Поэтому общее количество АО в категории В оказалось меньшим, чем сумма АО из всех подмножеств, ее составляющих.

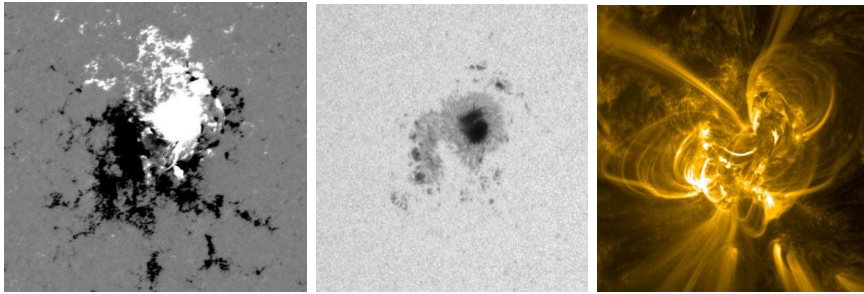


Рис. 7. АО с одновременным нарушением законов Хейла и Джоя, отнесенная одновременно к подмножествам HN и JN (слева направо): magnetogram, continuum, в свете линии 171 Å

Отметим также, что история жизни каждой из вошедших в каталог областей изучалась нами в сравнении на всех доступных снимках полного диска в свете различных линий, чтобы максимально использовать преимущества, предоставляемые обработкой данных “вручную”. В спорных случаях, преодолевая ограничения и трудности, мы принимали решение, основываясь на многократных просмотрах эволюции области до и после момента наблюдения, практически создавая мультипликационные серии из загруженных снимков в свете разных линий. После составления предварительной версии каталога все участки и соответствующие изображения полного диска были пересмотрены повторно для проверки и уточнения распределения АО по категориям.

2.3 Ограничения, надежность и неполнота

В разделе 2.1 упоминались различия между DD- и NRT-типами данных используемой серии sharp_sea_720s. Серия NRT использовалась нами вследствие предполагаемого удобства: соответствия геометрии участка SHARP геометрии изучаемой области в момент наблюдения. Однако на практике оказалось, что форму участков SHARP серии NRT, как и форму участков серии DD, нужно корректировать в соответствии с реальными размерами АО, что минимизировало ожидаемые преимущества. Кроме того, в серии NRT оказалось гораздо больше участков SHARP с упущенными NOAA номерами, которые нам приходилось восстанавливать по широте, долготе и внешнему виду области в процессе сравнения с визуальными наблюдениями. При этом помимо упомянутых геометрических, существуют другие различия в типах данных DD и NRT, связанные с длительностью процедуры обработки данных и устранением влияния космических лучей. Хотя эти различия обычно малы и локализованы (Хексма и др., 2014), в моменты вспышечной активности их влияние может быть заметным. Во время вспышек разница в значениях беззнакового магнитного потока, вычисленных по обеим сериям, может достигать 30%. Мы не проводили специальную проверку на наличие вспышек в исследуемых областях в момент наблюдения, т. к. вероятность этого события мала. Тем не менее она существует.

Дни (моменты) наблюдения были выбраны нами со скважностью в 9 дней, что позволяет получить непрерывную последовательную картину суммарного для всех наблюдаемых в каждый такой момент на Солнце АО общего (беззнакового) магнитного потока. Но в результате выбранного подхода в наш каталог вошли не все области на Солнце, доступные для наблюдения в изучаемый период с 2010 по 2017 гг., в том числе получившие номера по классификации NOAA. Все те области, которые всплыли после каждого предыдущего и исчезли до наступления последующего момента наблюдений, были упущены. Это, несомненно, будет оказывать влияние на статистические исследования, причем влияние усиливается с уменьшением времени жизни (и размеров) АО. Следует отметить, что при выборе меньшего промежутка времени между днями наблюдения мы увеличили бы число событий за счет повторной регистрации крупных долгоживущих областей, что также сказалось бы на будущих

исследованиях. Таким образом, наш выбор был продиктован потребностью в разумном балансе между двумя этими недостатками.

Тем не менее некоторые области вошли в каталог дважды, когда они находились вблизи восточного и западного лимбов, в два последовательных момента наблюдения. Это связано с выбором критерия, по которому мы исключали из рассмотрения АО, близкие к лимбу. Последнее необходимо, т. к. на магнитограммах, полученных вблизи лимба, возрастают искажения, увеличивается число пикселей со значением NaN, для таких магнитограмм перестает правильно работать μ -коррекция. Нарушения становятся заметными при долготях свыше 70° , с учетом чего и был определен нами соответствующий критерий. Сопутствующим эффектом стало то, что области, у которых центр тяжести потока близок к этому порогу (но не превышает его) наблюдались нами в два соседствующих момента наблюдения. Однако, поскольку известно, что многие АО могут изменять свое поведение в процессе эволюции, мы полагали 9 дней достаточным сроком для того, чтобы считать подобные события независимыми, и такие области вошли в каталог дважды. Отметим, что в процессе обработки при необходимости их можно исключить, используя номера NOAA-классификации.

Некоторые неоднозначности возникали также при распределении областей по категориям, описанном в разделе 2.2. Так, при изучении нескольких участков, приходящихся на период максимума активности и содержащих более одной области, мы испытывали трудности с разделением содержимого на отдельные АО. Фактически эти области представляли собой цепочки близкорасположенных пятен противоположной полярности и все были последовательно соединены между собой петельными связями. Как всегда при работе с такими участками, мы принимали решение о разделении, опираясь на изучение истории соответствующего участка на всех доступных изображениях полного диска, но в 2–3 случаях у нас нет уверенности в полной достоверности.

Изучение истории жизни областей, необходимое в случаях, описанных в предыдущем абзаце и выше, в предыдущем разделе, было невозможным, если область разрушалась вблизи восточного или всплывала вблизи западного лимба. Для таких участков приходилось в большей степени опираться на положение вещей, зафиксированное в момент наблюдения, а также полагаться на некоторые малозаметные, затруднительные для детального описания, признаки того или иного эволюционного развития области, некоторое различие которых было приобретено в процессе наблюдений.

Отметим, что неточности при распределении АО по категориям могут возникать также при определении биполярных групп анти-Хейл (HN). В некоторых случаях за такую область можно принять область, у которой лидирующее пятно имеет правильную для данного цикла и полушария полярность, но угол наклона настолько экстремален, что пятно последующей полярности можно перепутать с лидирующим пятном. Наличие таких ошибок никак не влияет на анализ поведения АО категории “неправильных” областей В в целом, но может сказываться на результатах исследования группы HN.

Возможно также, что в категорию “правильных” одиночных пятен (UY) могли попасть АО, у которых в последующей полярности нет ни пятен, ни даже слабых пор, но выраженные петельные связи явно свидетельствуют о том, что это очень старая разрушенная А-область. Поэтому при дальнейшем анализе следует учесть, что на поведение этой группы может накладываться воздействие от самых обычных “правильных” областей категории А, подчиняющихся всем законам и правилам.

Чтобы проверить, насколько описанные выше сомнительные случаи могут исказить результаты исследований для той или иной категории изучаемых нами областей, мы ввели дополнительный флаг Zero (0), присваиваемый признакам Hale, Joy, Leader наравне с флагами Yes (Y) и No (N). Флаг Zero фактически дублировал флаг N, но выражал при этом наши хотя бы и малейшие сомнения, возникшие при назначении соответствующего признака в процессе классификации АО. Введение этого флага позволило нам в дальнейшем проводить проверку любых обнаруженных зависимостей. Это возможно благодаря сопоставлению графиков, построенных для областей той или иной категории с использованием всех флагов, и графиков для областей этой же категории, но построенных с использованием только данных, отмеченных флагами Y и N, выражающими достаточную надежность в определении установленной категории. Построенные нами пробные зависимости общего магнитного потока от областей нескольких категорий, определенных в одном случае по флагам N и 0, а в другом – только по флагу N, оказались очень близки.

3 Обработка данных

Разброс в полученных нами значениях общего (беззнакового) магнитного потока для АО составил несколько порядков – от 10^{20} Мх до 10^{23} Мх. Кроме того, события расположены неравномерно вдоль временной шкалы: АО некоторых категорий наблюдались нами чаще других. Так, “правильные” области категории А составляли около половины всех областей, а дни, когда такие области были зарегистрированы нами на солнечной поверхности, – 87 % от всех дней наблюдений. Самым маленьким оказалось количество одиночных пятен UN. Количество дней, когда регистрировались такие пятна, составило только около 5 % от общего количества дней наблюдения.

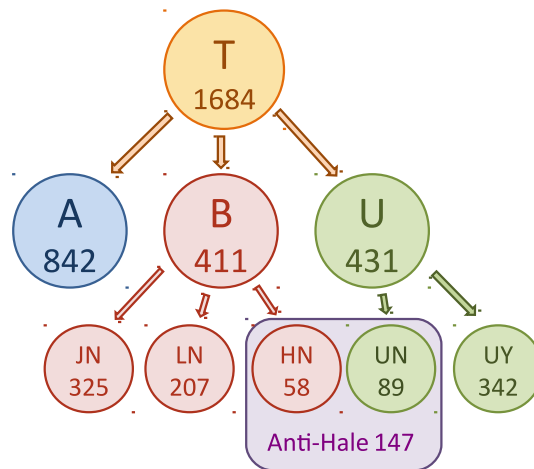


Рис. 8. Схема распределения АО по категориям

Совокупность всех исследованных областей обозначена как total (Т). Схема распределения областей по категориям представлена на рис. 8. Биполярные области обозначены следующим образом: А – “правильные” АО, удовлетворяющие закономерностям среднего поля; В – совокупность всех “неправильных” областей, для каждой из которых нарушена хотя бы одна закономерность. Группа Анти-Хейл (HN) включает в себя биполярные АО, для которых закон Хейла нарушен, и одиночные пятна, для которых закон нарушен как для лидирующего пятна биполярной области. Одиночные пятна представлены следующим образом: U – совокупность всех одиночных пятен; UY – одиночные пятна, для которых закон Хейла выполняется; UN (салатовый) – одиночные пятна, для которых закон Хейла нарушен. Статистические данные для различных категорий областей представлены в таблице 1.

Таблица 1. Категории областей и статистические параметры

	Все АО, Т	Группа А	Группа В	Все АО Анти-Хейл HN	Одиночные пятна U	Одиночные пятна Хейл, UY	Одиночные пятна Анти-Хейл, UN
Количество АО	1684	842	411	147	431	342	89
Количество дней наблюдения	309	269	191	110	215	201	72

Полученные дневные данные для категории Т использовались нами для нахождения пирсоновского коэффициента корреляции между общим (беззнаковым) магнитным потоком от всех исследованных АО и дневным числом солнечных пятен, соответствующим дням наблюдения. Коэффициент корреляции высокий: 0.79. Подобным же образом могут быть найдены коэффициенты корреляции для любой исследуемой категории областей. При этом, изучая ту или иную категорию, число солнечных пятен также следует учитывать только в соответствующие дни наблюдения. Например, если области категории Х наблюдались нами только в 1, 3, 5, 7 и т. д. дни наблюдений, то суммарные для каждого момента наблюдений значения чисел Вольфа нужно учитывать только в указанные дни.

При построении графических изображений зависимостей общего магнитного потока и числа солнечных пятен от времени как для всей совокупности АО, так и для областей каждой категории в отдельности, мы учитывали все имеющиеся в наличии данные (во все дни наблюдений АО этого типа). На рис. 9 представлены зависимости от времени общего (беззнакового) магнитного потока, просуммированного в каждый день (момент) наблюдений: по всем исследованным АО (черный); только по областям категории А, подчиняющимся закономерностям теории динамо среднего поля (синий); только по областям категории В, у которых хотя бы одна из этих закономерностей нарушена (красный).

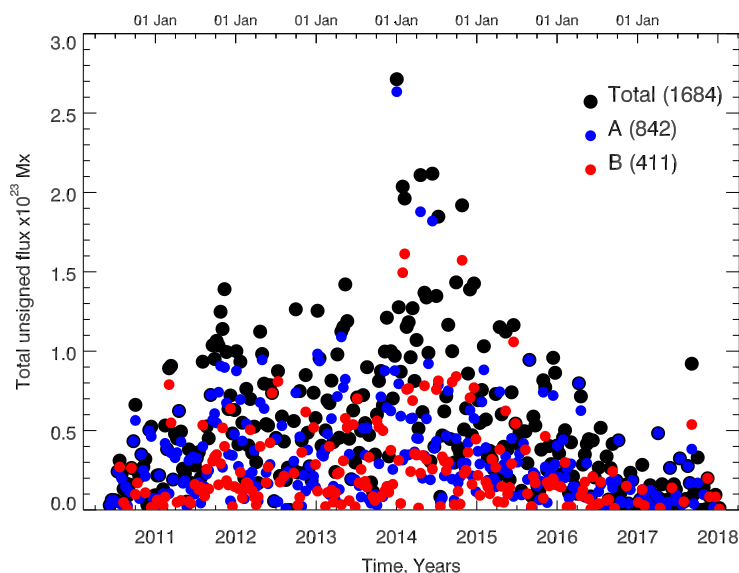


Рис. 9. Зависимость от времени общего (беззнакового) магнитного потока (total), просуммированного в каждый момент наблюдений: по всем АО (черный), по “правильным” областям категории А (синий) и по областям категории В с нарушениями закономерностей теории динамо среднего поля (красный)

Разброс данных на этом начальном этапе обработки велик и позволяет уловить лишь общие закономерности. Чтобы проявить существующие тенденции, мы опробовали несколько подходов, применяя их вместе или по отдельности к обработке данных для общего магнитного потока от АО разных категорий, а также к обработке данных по количеству солнечных пятен. Мы суммировали данные за промежутки времени (bins), объединяющие по несколько дней наблюдений (от 2 до 15). Мы использовали также для обработки данных метод скользящего среднего. На рис. 10 представлены зависимости от времени общего (беззнакового) магнитного потока (красный) и числа солнечных пятен (синий), сглаженные методом скользящего среднего.

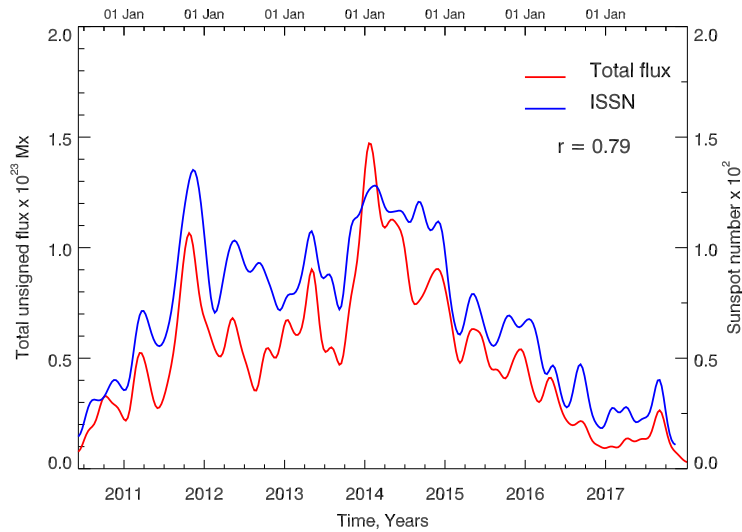


Рис. 10. Зависимость общего (беззнакового) магнитного потока (красный) и числа солнечных пятен (синий) от времени, сглаженная при помощи метода скользящего среднего

Как видно, полученные зависимости общего (беззнакового) магнитного потока и числа солнечных пятен синхронизированы. Это, как и высокий коэффициент корреляции, подтверждает хорошее согласование полученных нами потоковых данных с циклом солнечной активности.

4 Заключение

В результате проделанной на основе данных инструмента HMI/SDO работы нами был составлен каталог АО, доступных для наблюдения на видимой поверхности Солнца в период с 07.06.2010 по 08.01.2018. В каталог вошли данные по АО, удовлетворяющим установленным нами заранее важным критериям (область не должна находиться вблизи лимба, поток от нее должен быть не менее 10^{20} Мх и другим, описанным выше) и прошедшие всю необходимую предварительную обработку. Для каждой из 1684 изученных АО каталог содержит данные по вычисленному нами магнитному потоку, дату и время наблюдения, классификационные номера NOAA и HARP (индивидуальные номера участков SHARP), гелиографические широту и долготу границ участка, другую техническую информацию.

Все АО, вошедшие в каталог, классифицированы в соответствии с возможностью отнесения их возникновения к действию глобального динамо среднего поля. Области распределены по следующим категориям: А – “правильные” АО, удовлетворяющие основным закономерностям теории динамо среднего поля; В – области-“нарушители”, для которых не выполняется хотя бы одна из закономерностей теории динамо среднего поля. Одиночные пятна были отнесены нами к отдельной, третьей, категории и также упорядочены с точки зрения соответствия теории глобального динамо. Категории “неправильных” АО категории В и одиночных пятен разделены, в свою очередь, на подмножества.

Таким образом, каталог представляет собой непрерывную последовательность обработанных и структурированных данных для АО, находящихся на видимой поверхности Солнца, и охватывает практически весь 24-й 11-летний цикл солнечной активности. Это означает, что по данным нашего каталога можно судить об изменении магнитного потока от всех АО, либо от областей каких-либо выбранных категорий, а также других величин с циклом солнечной активности. Наши данные могут быть полезны при проведении научных исследований, связанных с выявлением соотношения между такими процессами, как глобальное динамо среднего поля и мелкомасштабное турбулентное динамо, что может расширить наши представления об источниках генерации магнитных полей на Солнце.

Каталог и соответствующее описание доступны на веб-сайте Крымской астрофизической обсерватории РАН⁴.

5 Благодарности

Работа поддержана грантом РФФИ (Проект 18-12-00131). SDO является частью программы NASA Living With a Star (LWS). Данные инструмента HMI/SDO предоставляются операционным центром Joint Science Operation Center (JSOC). Данные о числе солнечных пятен предоставляются обсерваторией Royal Observatory of Belgium, Brussels.

Литература

- Бобра и др. (Bobra M.G., Sun X., Hoeksema J.T., Turmon M., Liu Y., et al.) // *Solar Phys.* 2014. V. 289. P. 3549.
- ван Дриель-Гештелей, Грин (van Driel-Gesztelyi L., Green L.M.) // *Liv. Rev. Solar Phys.* 2015. V. 12. P. 1.
- Гротриан, Кюнцель (Grottrian W., Kuenzel H.) // *Zeitschrift fuer Astrophysic.* 1950. V. 28. P. 28.
- Куценко, Абраменко (Kutsenko A.S., Abramenko V.I.) // *Solar Phys.* 2016. V. 291. P. 1613.
- Лайтс и др. (Lites B.W., Skumanich A., Martínez Pillet V.) // *Astron. Astrophys.* 1998. V. 333. P. 1053.
- Лиу и др. (Liu Y., Hoeksema J.T., Scherrer P.H., Schou J., Couvidat S., et al.) // *Solar Phys.* 2012. V. 279. P. 295.
- Нортон и др. (Norton A.A., Graham J. Pietarila, Ulrich R.K., Schou J., Tomczyk S., et al.) // *Solar Phys.* 2006. V. 239. P. 69.
- Стенфло, Косовичев (Stenflo J.O., Kosovichev A.G.) // *Astrophys. J.* 2012. V. 745. P. 129.
- Хексма и др. (Hoeksema J.T., Liu Y., Hayashi K., Sun X., Schou J., et al.) // *Solar Phys.* 2014. V. 289. P. 3483.
- Шеррер и др. (Scherrer P.H., Schou J., Bush R.I., Kosovichev A.G., Bogart R.S., et al.) // *Solar Phys.* 2012. V. 275. P. 207.
- Шоу и др. (Schou J., Scherrer P.H., Bush R.I., Wachter R., Couvidat S., et al.) // *Solar Phys.* 2012. V. 275. P. 229.

⁴ <http://crao.ru/ru/novosti/440-katalog-aktivnykh-oblastej-solntsa>