

ПРОЯВЛЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ГЛОБАЛЬНОГО СОЛНЕЧНОГО ДИНАМО

Абраменко В.И.

Крымская Астрофизическая Обсерватория РАН, Научный, Крым, Россия

SIGNATURE OF THE TURBULENT COMPONENT OF GLOBAL SOLAR DYNAMO

Abramenko V.I.

Crimean Astrophysical Observatory of RAS, Nauchny, Crimea, Russia

Full-disk solar magnetograms acquired with the space-based instruments SOHO/MDI and SDO/HMI from May 1996 till December 2021 allowed us to retrieve time profiles of the total unsigned magnetic flux attributed to active regions (ARs) of various magnetomorphological classes. Our aim was to segregate the flux from all ARs on the disk into components associated with regular bipolar ARs (according to the Babcock-Leighton model) and irregular ARs. The structure of the later is supposed to be affected by an influence of turbulence in the convection zone during their lifting to the surface. It was found that the overall shape of a solar cycle is determined by regular ARs, whereas the fine structure of solar maxima is determined by the most irregular ARs. During a maximum of a cycle, contributions into the total flux from regular and irregular ARs are close (about 45–50%). A deepest minimum between cycles is reached simultaneously by all classes. During a minimum, only the most simple bipolar ARs are observed. The highest flaring activity is observed in the most complex irregular ARs. A conclusion was that solar dynamo operates as a unique process and generates ARs of all classes (with the flux above 10^{21} Mx), whereas the turbulent component of dynamo distorts a half of the emerging toroidal flux, determines the fine structure of the time profile of a cycle during a maximum, causes the extreme flaring during a cycle.

DOI: 10.31725/0552-5829-2022-3-8

Считается общепринятым, что магнитное поле генерируется в виде тороидальных трубок в глубине конвективной зоны, трубки слегка наклонены по отношению к экватору, так что когда они появляются на поверхности, то они образуют биполь, у которого лидирующее пятно расположено ближе к экватору. При этом для биполей выполняется еще ряд хорошо известных эмпирических правил [1, 2]. Это работа регулярной составляющей динамо-процесса. Однако подъем трубок происходит в турбулентной среде, где неизбежны взаимные влияния между турбулентными потоками плазмы и магнитным полем. В результате должна неизбежно присутствовать и турбулентная составляющая динамо. На поверхности мы наблюдаем их совместный результат, и разделить компоненты практически невозможно. Один из способов выявить турбулентную компоненту – разделить магнитный поток от всех активных областей (АО) на диске Солнца на составляющие, связанные с регулярными биполями (по модели Бэбкока-Лейтона [1]) и с нерегулярными АО, структура которых подвержена турбулентному

вмешательству в процессе подъема. При этом желательно, чтобы степень турбулентного вмешательства нарастала для подклассов АО. Такая классификация была разработана в [3, 4] и применена к АО 23-го и 24-го циклов. Согласно этой классификации, биполярные АО, подчиняющиеся законам теории динамо среднего поля (закон полярностей Хейла, закон Джоя о преимущественном наклоне оси АО, правило доминирования лидирующего пятна по сравнению с хвостовым) принадлежат классу регулярных АО и подразделяются на два подкласса: A1 – регулярные АО без особенностей; A2 – регулярные АО с небольшой дельта-структурой, пятна которой существенно меньше основных пятен АО. A2-области можно рассматривать как структуры с минимальным вмешательством подфотосферной турбулентности. Примеры показаны на рис. 1.

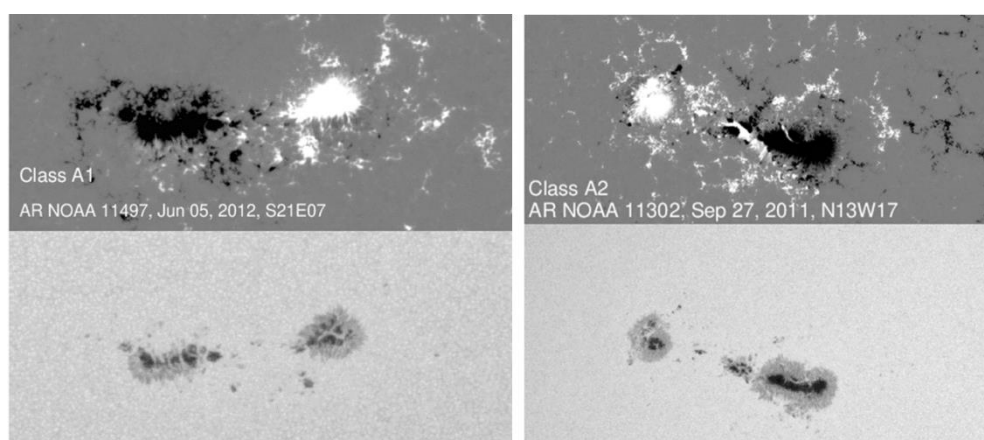


Рис. 1. Примеры активных областей классов A1 и A2. Север вверху, запад справа. Магнитограммы масштабированы от -800 (черное) до 800 (белое) Гаусс.

Униполярные пятна выделены в особый класс U, составляющий около 10% по потоку. Все остальные АО составляют класс нерегулярных АО, класс В, и тоже подразделяются на подклассы. В1 – биполярные области, нарушающие хотя бы один из выше перечисленных эмпирических законов; рассматриваются как одиночные трубки, на которых турбулентность сказалась лишь в изменении либо ориентации, либо наклона трубки. В2 – мульти-полярные АО, состоящие из двух или более со-направленных би-полей, и также сильные дельта-структуры, рассматриваются как результат фрагментации и/или сильной скрученности единой тороидальной трубки; примеры показаны на рис. 2. В3 – сложные мульти-полярные области, где пятна противоположных полярностей расположены хаотически, так, что невозможно выделить отдельные биполи (рис. 3). Мы полагаем, что это результат всплытия нескольких трубок, перепутанных турбулентностью.

Чтобы исследовать продуктивность динамо в плане генерации активных областей разных классов, нам приходится анализировать независимые полно-дисковые магнитограммы и разбивать поток от всех АО на составляющие по классам. Чтобы обеспечить независимость, мы берем магнито-

грамму на каждый девятый день, получая таким образом 3 попытки на оборот Солнца. Для каждой АО с потоком выше 10^{21} Мкс определяется ее класс и полный поток магнитного поля. Затем вычисляются суммарные по магнитограмме потоки по классам. Данные по каждому классу усредняются скользящим средним сначала за оборот (по три последовательные магнитограммы), а затем за интервал 13 месяцев. Полученные ряды магнитного потока, сосредоточенного в активных областях данного класса, являются основным объектом дальнейшего анализа (см. рис. 4).

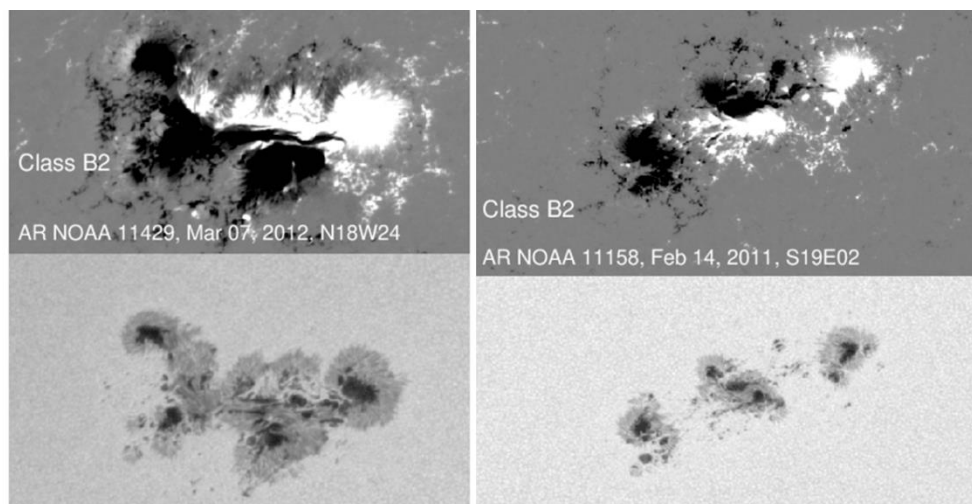


Рис. 2. Примеры активных областей класса B2. Обозначения те же, что на рис. 1.

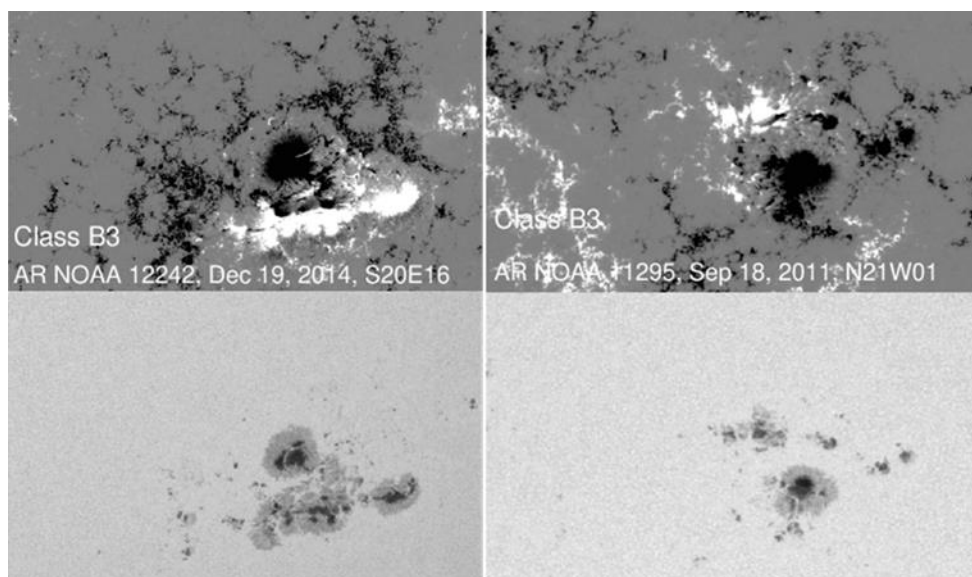


Рис. 3. Примеры активных областей класса B3. Обозначения те же, что на рис. 1.

На рисунке 4 самая верхняя тонкая кривая – это суммарный поток от всех АО на диске, а кривые ниже – это его составляющие по классам. Графики показывают, что потоки разных классов (и их комбинации) изменяются в основном синхронно с суммарным потоком, то есть, с циклом. Периоды самых глубоких минимумов наблюдаются одновременно по всем

классам, причем в минимумах наблюдаются только самые простые АО: A1-области и в два раза реже – B1-области. Расчеты показывают, что коэффициент корреляции между профилями потоков по разным классам довольно высок, меняется в пределах от 0.855 (между B2 и A1) до 0.982 (между A1+A2 и суммарным потоком). Эти наблюдательные факты позволяют предполагать, что подъем, максимум, спад и глубокий минимум происходят синхронно для активных областей всех классов, то есть глобальное динамо как единый процесс генерирует поток всех активных областей, а турбулентность конвективной зоны влияет лишь на конфигурацию всплывающих трубок. По крайней мере, мы не обнаруживаем свидетельства присутствия не зависящего от цикла динамо-процесса генерации активных областей.

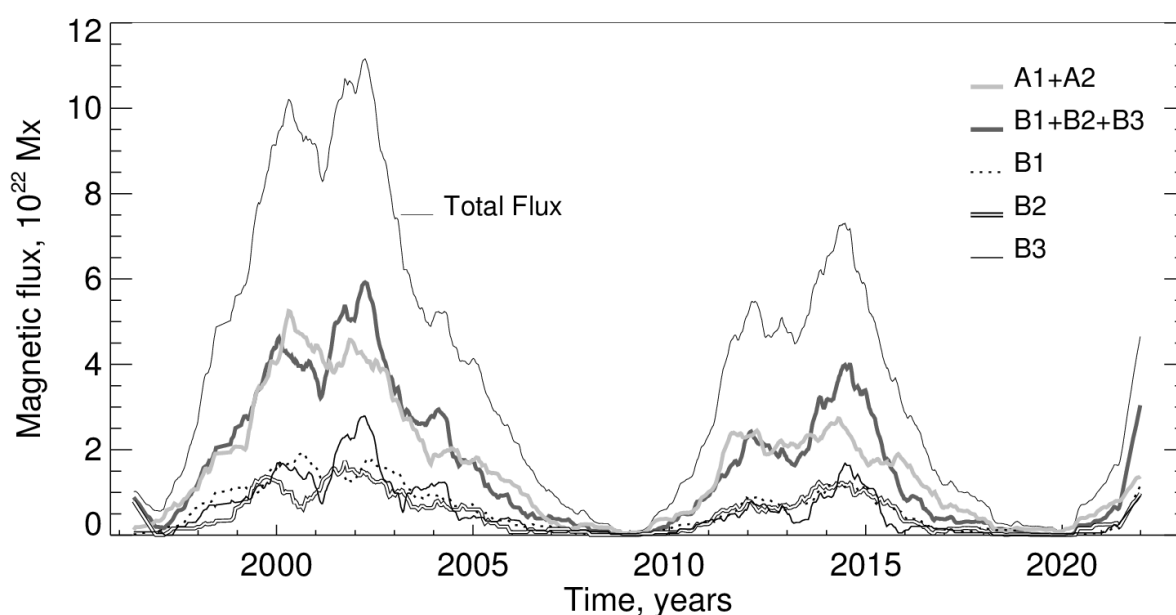


Рис. 4. Профили составляющих магнитного потока активных областей разных классов.

David Hathaway [5] предложил использовать усредненный по многим циклам профиль цикла как некий стандарт поведения солнечной активности за 11-летний период. Средний цикл показан на рис. 27 в работе [5]. Расчет корреляции между средним циклом и полученными профилями потоков по классам показал, что лучше других коррелирует со средним циклом поток от A1-областей и суммарный поток от всех бипольных структур A1+A1+B1, коэффициент корреляции $CC = 0.979$ для 23-го цикла и 0.967 для 24-го. По мере перехода к более сложным магнито-морфологическим классам корреляция со средним циклом снижается до 0.868 (23-й цикл) и 0.761 (24-й цикл) для B3-областей.

На рис. 4 по профилям потоков регулярных областей (A1+A2) видно, что в 23-м цикле первый пик 2000 года хорошо виден, а второй пик 2002 года едва намечается (дополнительные исследования показали, что 2002-пик в профиле A1+A2 появляется за счет A2-областей). В 24-м цикле

A1+A2 профиль в максимуме скорее плоский, чем двух-пиковый, хотя общий поток показывает двух-пиковую структуру. Появление двух-пиковой структуры в обоих циклах явно прослеживается на профилях нерегулярных областей: оба пика, но в особенности второй (2002 и 2014 годы) становятся выше и заметнее при переходе от V1 к V2 к V3-областям, и в конечном счете суммарный профиль нерегулярных областей V1+V2+V3 в обоих циклах удивительно похож на профиль общего потока. Коэффициент корреляции по всему ряду данных между общим потоком и V1+V2+V3 потоком составляет 0.933, а между общим потоком и V2+V3 он еще выше, 0.966.

Можно сделать вывод о том, что общая форма цикла определяется потоком регулярных областей, а тонкая структура цикла в периоды высокой активности – потоком нерегулярных областей.

Данные рисунка 4 позволяют оценить количественный состав общего магнитного потока по классам активных областей. В периоды активной фазы циклов вклады от регулярных (A1+A2) и нерегулярных (V1+V2+V3) АО примерно равны и составляют по 45% в годы первых пиков (2000 и 2012 годы). Во время второго пика в 23-м (24-м) цикле вклад нерегулярных возрастает до 55% (57%). И это при условии, что нерегулярные области в совокупности составляют только 32% общего количества (таблица). Если полагать, что турбулентность в конвективной зоне влияет на конфигурацию всплывающих тороидальных трубок, то мы приходим к заключению, что, по крайней мере, в годы повышенной активности, этот процесс весьма эффективен: около половины сгенерированного глобальным динамо потока активных областей меняет свою конфигурацию под влиянием турбулентности.

Таблица. Количественный состав общего магнитного потока активных областей (усредненные по двум циклам данные).

Класс	Количество активных областей	Доля от общего количества, p	Доля от общего потока, q	q/p
U	581	0.191	0.117	0.612
A1	1400	0.459	0.362	0.789
A2	104	0.034	0.077	2.265
V1	578	0.190	0.162	0.853
V2	203	0.066	0.136	2.061
V3	180	0.059	0.150	2.542

Из таблицы следует, что униполярные пятна и биполярные области A1 и V1 вносят приблизительно одинаковую долю как в общее количество, так и в общий поток, отношение q/p близко к единице, что характерно для нормального распределения. При этом мы наблюдаем резко отличающуюся ситуацию для остальных классов: A2, V2 и V3. Для них отношение q/p

больше двух – доля в общем потоке в два раза больше, чем доля в количестве. Кроме общего вывода, что эти области в целом более крупные, наблюдаемый факт свидетельствует о том, что эти структуры отражают нелинейные процессы в формировании активных областей (более высокий статистический момент растет быстрее, см., например, [6, 7]). По-видимому, не случайно в работе [4] при выборке активных областей, давших X-класс вспышки в 23-м и 24-м циклах, 73 из 79-ти областей принадлежали именно этим классам – A2 (16), B1(7), B2 (25) и B3 (25).

Литература

1. Babcock H.W. // *ApJ*, 1961, v. **133**, p. 572.
2. van Driel-Gesztelyi L., Green L.M. // *LRSP*, 2015, **12**, 1
3. Abramenko V.I., Zhukova A.V., Kutsenko A.S. // *Ge&Ae*, 2018, v. **58**, p. 1159.
4. Abramenko V.I. // *MNRAS*, 2021, v. **507**, p. 3698.
5. Hathaway D.H. // *LRSP*, **12**, 4.
6. Зельдович Я.Б., Молчанов С.А., Рузмайкин А.А., Соколов Д.Д. // *УФН*, 1978, т. **152**, с. 3.
7. Frisch U. *Turbulence. The Legacy of A.N. Kolmogorov*. Cambridge Univ. Press. 1995. 296 pp.