

ЭВОЛЮЦИЯ ЛОКАЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ СТРУКТУР НА СОЛНЦЕ

А.А. Головки

EVOLUTION OF LOCAL MAGNETIC STRUCTURES ON THE SUN

A.A. Golovko

Эволюция локальных магнитных структур – комплексов активности, активных областей, эфемерных активных областей, магнитных узлов – образует сложную перемежаемую картину магнитного поля Солнца. Параметрическая система классификации структур на основе величины их максимального магнитного потока F и времени жизни τ позволила выявить главную последовательность магнитных структур. В тех случаях, когда наблюдения позволяют проследить эволюцию биполярной магнитной структуры от ее рождения до исчезновения и оценить F и τ , выполняется соотношение $\lg F = A + b \lg \tau$. Если время измеряется в секундах, а магнитный поток – в веберах, то $A=14$ и $b=1.2$. Другими авторами подтверждена справедливость этого соотношения для самых мелкомасштабных магнитных элементов, так что общий охватываемый диапазон составил шесть порядков величины. На таком же диапазоне установлено степенное соотношение для функции распределения вероятности. Степенное соотношение является математическим выражением самоподобия локальных магнитных структур разных масштабов и согласуется с фрактальной геометрией магнитных полей в солнечной фотосфере. Эта концепция привлекательна компактностью описания и перспективна для исследования динамики солнечных магнитоплазменных образований на субтелескопических (~10 км) масштабах.

Сложная перемежаемая картина распределения магнитного поля на поверхности Солнца в основном формируется непрерывно эволюционирующими локальными магнитными структурами. К ним можно отнести комплексы активности, активные области (АО), эфемерные АО, магнитные узлы. Наша задача состояла в развитии параметрической системы классификации этих структур на основе величины их максимального магнитного потока F и времени жизни τ . В процессе возникновения локальной магнитной структуры ее магнитный поток быстро возрастает, достигает максимума и затем постепенно уменьшается до фонового значения. Форма эволюционной кривой может быть различной, но всегда можно оценить указанные параметры F и τ .

На рис. 1 представлена диаграмма (F , τ), предложенная впервые в работе [Головки, 1986]. Она построена на основе наблюдений магнитных полей активных областей с помощью панорамного магнитографа Саянской обсерватории ИСЗФ [Клочек и др., 1975] в 1973–1983 гг. Для семнадцати активных областей с простой биполярной магнитной структурой было получено степенное соотношение между магнитным потоком и временем жизни в логарифмическом виде

$$\lg F = A + b \lg \tau. \quad (1)$$

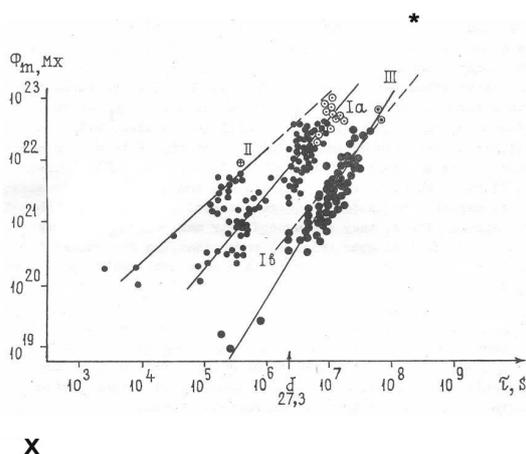


Рис. 1.

В дальнейшем был привлечен гораздо больший по объему наблюдательный материал: данные по 768 активным областям [Harvey, 1993], 96 эфемерным активным областям [Scriver, Harvey, 1994], 11 долгоживущим пятнам [Гневышева, 1962] и по короткоживущим группам пятен [Куклин, 1973]. Результаты были обобщены в работе [Головки, 1998], в которой построена более полная диаграмма (рис. 2).

Выявлена главная последовательность регулярных локальных магнитных структур «комплексы активности – большие АО – малые короткоживущие АО – эфемерные АО», для которой хорошо выполняется соотношение (1), т. е. между магнитным потоком и временем жизни существует степенное соотношение. Аналогичный результат получен в работе [Контор, 1987]. Карпинский В.Н. расположил данные о структурных элементах и колебаниях в солнечной фотосфере на единой диаграмме частота – волновое число [Карпинский, 1998]; иерархия структур на диаграмме согласуется с нашим результатом.

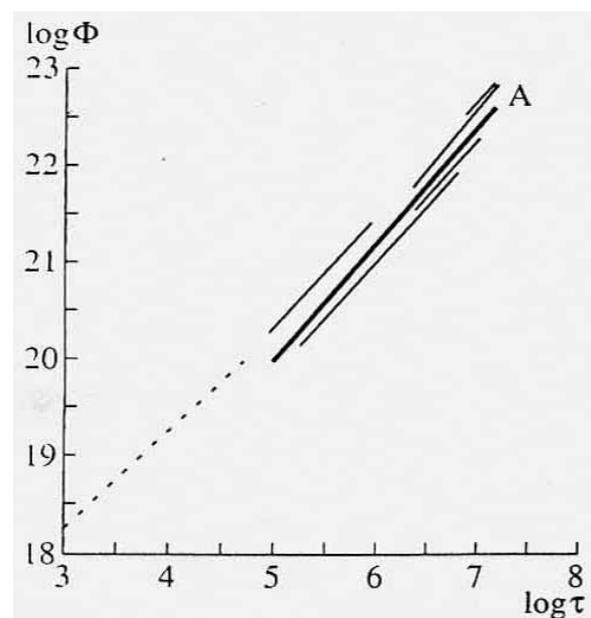


Рис. 2.

Эволюционные кривые могут быть рассчитаны не только для локальных магнитных структур, но и для холмов крупномасштабного магнитного поля, регистрируемого в Стенфордской обсерватории в США и в Саянской обсерватории ИСЗФ с помощью инструмента СТОП [Григорьев, Пешеров, 1983]. В начале цикла солнечной активности можно проследить эволюцию таких образований наиболее отчетливо. Оценки F и τ для таких образований – промежуточной формы между локальными структурами и глобальным крупномасштабным магнитным полем Солнца — выполнены в работе [Golovko, 1989]. На общей диаграмме (см. рис. 3) они образуют ветвь крупномасштабных магнитных образований. Аппроксимирующая эту ветвь прямая имеет иной наклон и асимптотически пересекается с главной последовательностью в точке с координатами $F=10^{24}$ Мкс и $\tau=22$ года. Это соответствует оценке для магнитного поля солнечного цикла, приведенной в работе [Harvey, 1993]. Если это поле представить как единый связанный эволюционирующий комплекс, как предложил Степанов в работе [Александрович, Степанов, 1971], то соответствующая точка (*) на диаграмме на рис. 3 отражает эту реальность. Наш параметрический метод, таким образом, выявляет и связывает две стороны магнитного поля солнечного цикла – глобальное крупномасштабное поле и локальные магнитные структуры.

На диаграмме присутствует третья, верхняя, ветвь, и о ней следует сказать особо. В сложных мультиполярных активных областях, где происходят мощные вспышки, можно выявить отдельные «неустойчивые» пятна и факелы, время жизни которых оказывается в несколько раз меньше времени жизни регулярных структур. В работе [Bumba, 1986] описан случай быстро появившегося и быстро исчезнувшего пятна с полутенью. В области самых коротких времен жизни (несколько минут) нанесены точки, соответствующие «магнитным транзиентам», наблюдаемым во время солнечных вспышек в виде биполярных образований и описанным в работе [Zirin, Tanaka, 1981]. Впоследствии реальность таких структур была подтверждена в работах [Kosovichev, Zharkova, 1999, 2001].

Главная последовательность локальных магнитных структур имеет продолжение в сторону образований наименьшего масштаба. Это показано в работе [Zhou et al., 2010] и отражено на рис. 3. Таким образом, в итоге мы имеем последовательность, включающую шесть порядков величины, и для нее выполняется соотношение [Головки, 1998]

$$\lg F = 14 + 1.2 \lg \tau, \quad (2)$$

где поток F выражен в Вб, а τ – в секундах.

В таком же диапазоне установлено степенное соотношение для функции распределения вероятности [Parnell et al., 2009].

Из диаграммы следует, что скорость роста магнитного потока находится в пределах $(0.6 \div 1.5) \times 10^8$ Вб/с $((2.2 \div 5.4) \times 10^{19}$ Мкс/ч) для медленной эволюции регулярных АО и $(3 \div 6) \times 10^8$ Вб/с $((1.1 \div 2.2) \times 10^{20}$ Мкс/ч) для быстрой эволюции.

Указанные скорости – средние за период роста нового потока, мгновенные же скорости могут быть

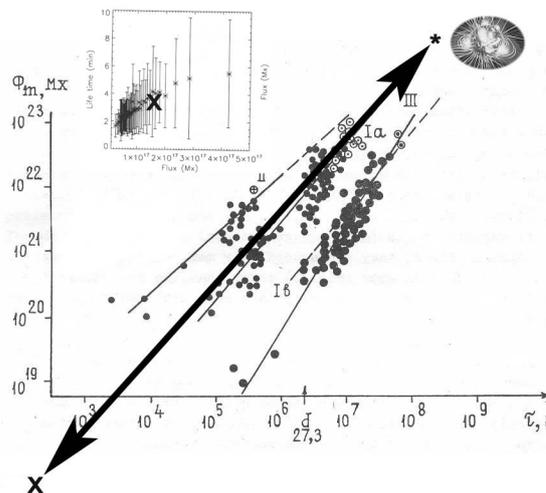


Рис. 3.

выше. В работе [Khlystova, 2011] приводится кривая изменения магнитного потока в новой АО, из которой следует скорость роста потока 2×10^{20} Мкс/ч.

Точки на диаграмме (F, τ) показывают определенный разброс относительно аппроксимирующей прямой. Если для заданного измеренного магнитного потока F формула (2) дает стандартное время жизни τ_{st} , то разность $\Delta = \log \tau_{obs} - \log \tau_{st}$, где τ_{obs} – реально измеренное время жизни, может служить мерой ускорения или замедления развития структуры. В работе [Golovko, 2002] оценки Δ были сделаны для многих малых АО и получено, что АО в парных ассоциациях развиваются быстрее, чем одиночные. Следовательно, взаимодействие АО с другими локальными структурами может быть причиной разброса точек на диаграмме (F, τ) .

Интерпретация диаграммы (F, τ) и ветвей на ней связана с проблемой происхождения локальных магнитных структур. Среди гипотез о физическом механизме возникновения активных областей на Солнце ведущей является гипотеза о выходе на поверхность Солнца из конвективной зоны системы магнитных жгутов, имеющих арочную (формы Ω) конфигурацию. Наблюдательное подтверждение данной идеи можно найти в работах [Varru et al., 1968; Григорьев, Ермакова, 1976; Zhang, 1995; Ермакова, 2000]. В рамках этой концепции главная последовательность на диаграмме магнитный поток – время жизни соответствует эволюции вынесенной на поверхность Солнца свободно развивающейся магнитной арочной системы, основания которой остаются закрепленными в плотной фотосфере. Магнитные структуры главной последовательности различаются только пространственным масштабом и, соответственно, величиной вынесенного магнитного потока. Время жизни связано с процессом его диссипации. Диссипация определяется масштабом элементов тонкой структуры с участием волновой турбулентности, которая увеличивает время диссипации [Криводубский, 1983].

Степенное соотношение между магнитным потоком и временем жизни соответствующей локальной структуры является математическим выражением самоподобия локальных магнитных структур разных

масштабов и согласуется с фрактальной геометрией распределения магнитных полей в солнечной фотосфере [Lawrence et al., 1990; Graham et al., 2009]. Существует возможность экстраполяции данного соотношения на область сверхтонкой структуры (10 км) и получения таким образом дополнительных сведений о структуре субтелескопических магнитоплазменных образований.

Кроме явлений регулярной эволюции, на Солнце происходят и скачкообразные быстрые изменения магнитного поля – например, во время солнечной вспышки [Petrie, Sudol, 2010]. Другим видом изменений, не описываемых предложенной здесь параметрической классификацией, является взаимное гашение магнитных потоков N- и S-полярностей (magnetic cancellation) [Martin et al., 1985]. Выход нового магнитного потока в различных масштабах, тем не менее, тесно связан с нестационарными процессами в АО и комплексах активности, с активизацией существующих магнитных структур. Поэтому задача выявления и мониторинга новых магнитных потоков актуальна для прогноза вспышек и корональных выбросов массы.

Новый магнитный поток можно обнаружить, используя последовательность магнитограмм, позволяющую проследить развитие и построить эволюционные кривые, либо выявив его по морфологическим признакам: например, по крутым градиентам в окрестности линии раздела полярностей. На рис. 4 приведены оригинальная магнитограмма продольного поля, полученная с помощью инструмента SOLIS обсерватории Китт-Пик, рассчитанная по ней карта оценки модуля горизонтального градиента и две карты, полученные методом мультифрактального анализа согласно методике, описанной в работе [Головко, Салахутдинова, 2009]. Обсуждение подобных методов приведено в работе [Круглун и др., 2007]. На карте гельдеровской экспоненты видно, что минимальная сингулярность сосредоточена на том участке АО, где существует наибольший горизонтальный градиент. Сегментированное изображение

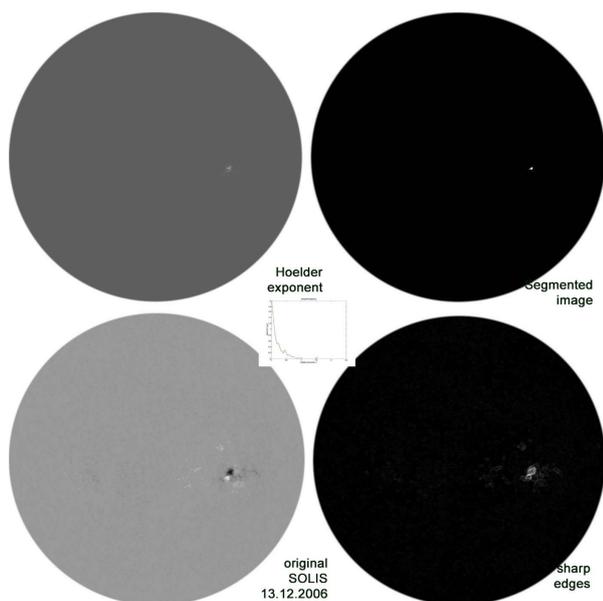


Рис. 4.

(построенное в бинарной форме) довольно точно отражает локализацию нового магнитного потока. Одновременно с методом сегментированных изображений в работе [Князева и др., 2011] развит метод выявления всплывающего нового магнитного потока, использующий число несвязных компонент – количество пикселей в изображении, различных по значениям напряженности. Таким образом, мультифрактальный анализ дает значимые результаты, которые можно использовать для оперативной диагностики новых магнитных потоков.

В заключение можно сделать следующие выводы:

1. Диаграмма магнитный поток – время жизни построена в диапазоне шести порядков величины и может служить средством описания эволюции солнечных магнитных структур.

2. Основная последовательность локальных магнитных структур, таких как комплексы активности, активные области, эфемерные активные области, описывается соотношением $\lg F = A + b \lg t$.

3. Метод мультифрактального анализа может успешно использоваться в качестве средства оперативной диагностики новых магнитных потоков на Солнце.

Работа поддержана РФФИ, проекты 11-02-00333-а и 11-02-92202_Монг_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Александрович И.И., Степанов В.Е. Магнитные поля и лучевые скорости в развитой активной области // Исслед. по геомагн., аэроном. и физике Солнца. 1971. Вып. 2. С. 15–49.

Гневнышева Р.С. Каталог солнечной деятельности за 1957 г. Л.: Изд-во АН СССР, 1962. 230 с. (Труды ГАО).

Головко А.А. Области нового магнитного потока с быстрой эволюцией. I. Диаграмма «магнитный поток – время жизни» // Солнечные данные. 1986. № 4. С. 48–53.

Головко А.А. Соотношение между максимальным магнитным потоком и временем жизни солнечных активных областей // Астрономический журнал. 1998. Т. 75, № 4. С. 618–625.

Головко А.А., Салахутдинова И.И. Фрактальные свойства нового магнитного потока // Год астрономии: Солнечная и солнечно-земная физика 2009. Труды Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца. СПб. 2009. С. 125–128.

Григорьев В.М., Ермакова Л.В. Возникновение и эволюция активных областей на Солнце. М.: Наука, 1976. С. 54–58.

Григорьев В.М., Пещеров В.С. Солнечный телескоп оперативных прогнозов // Исслед. по геомагн., аэроном. и физике Солнца. М.: Наука, 1983. Вып. 64. С. 80–95.

Карпинский В.Н. Система структур на Солнце // Известия РАН. Серия физ. 1998. Т. 62, № 9. С. 1840–1845.

Клочек Н.В., Григорьев В.М., Круглов В.И. Панорамный магнитограф СибИЗМИР // Новая техника в астрономии. 1975. Вып. 5. С. 25–26.

Князева И.С., Макаренко Н.Г., Лившиц М.А. Выявление всплывающего нового магнитного поля из топологии SOHO/MDI-магнитограмм // Астрономический журнал. 2011. Т. 88, № 5. С. 503–512.

Контор Н.Н. О спектре мелкомасштабных магнитных структур на Солнце // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. 1987. Т. 28, № 4. С. 81–86.

Кривоудубский В.Н. О магнитной диффузии солнечных пятен // Солнечные данные. 1983. № 11. С. 51–57.

Круглун О.А., Каримова Л.М., Мухамеджанова С.А., Макаренко Н.Г. Мультифрактальный анализ и моделиро-

- вание магнитограмм полного диска Солнца // Солнечно-земная физика. 2007. Вып. 10. С. 31–42.
- Куклин Г.В. О двух популяциях групп пятен // Солнечные данные. 1973. № 2. С. 53–60.
- Варру М.К.В., Григорьев В.М., Степанов В.Е. On the development of magnetic fields in the active regions // Solar Phys. 1968. V. 4. P. 409–421.
- Bumba V. Main Phases of active region's magnetic field development // Bull. Astron. Inst. Czechosl. 1986. V. 37, N 5. P. 281–291.
- Ermakova L.V. Evolution of magnetic flux distribution of solar bipolar active regions // Solar Physics. 2000. V. 191, N 1. P. 161–169.
- Golovko A.A. «The magnetic flux – evolution time» diagram for solar magnetic features of different scales // Solar Magnetic Fields and Corona. Novosibirsk: Nauka, Siberian Division, 1989. V. 1. P. 102–107.
- Golovko A.A. The evolution rate of small active regions and its temporal and spatial variations // COSPAR Colloquia Series. 2002. V. 14. P. 63–66.
- Graham J.P., Danilovic S., Schussler M. Turbulent magnetic fields in the quiet Sun: implications of Hinode observations and small-scale dynamo simulations // Astrophys. J. 2009. V. 693. P. 1728–1735.
- Harvey K.L. Magnetic bipoles on the Sun. Utrecht, 1993. 332 p.
- Khlystova A.I. Center-limb dependence of photospheric velocities in regions of emerging magnetic fields on the Sun // Astron. & Astrophys. 2011. V. 528, N A7.
- Kosovichev A.G., Zharkova V.V. Variations of photospheric magnetic field associated with flares and CMEs // Solar Phys. 1999. V. 190. P. 459–466.
- Kosovichev A.G., Zharkova V.V. Magnetic energy release and transients in the solar flare of 2000 July 14 // Astrophys. J. 2001. V. 550. P. L105–L108.
- Lawrence J.K., Ruzmaikin A.A., Cadavid A.C. Multifractal measure of the solar magnetic field // Astrophys. J. 1993. V. 417. P. 805–811.
- Martin S.F., Livi S.H.B., Wang J. The cancellation of magnetic flux. II. In a decaying active region // Austral. J. Phys. 1985. V. 38, N 6. P. 929–959.
- Parnell C.E., DeForest C.E., Hagenaar H.J., et al. A power-law distribution of solar magnetic fields over more than five decades in flux // Astrophys. J. 2009. V. 698, N 1. P. 75–85.
- Petrie C.J.D., Sudol J.J. Abrupt longitudinal magnetic field changes in flaring active regions // Astrophys. J. 2010. V. 724. P. 1218–1237.
- Scriver C.J., Harvey K.L. The photospheric magnetic flux budget // Solar Phys. 1994. V. 150. P. 1–18.
- Zhang H. Formation of magnetic shear and an electric current system in an emerging flux region // Astron. & Astrophys. 1995. V. 304. P. 541.
- Zirin H., Tanaka K. Magnetic transients in flares // Astrophys. J. 1981. V. 250. P. 791–795.
- Zhou G.P., Wang J.X., Lin C.L. Solar intranetwork magnetic elements: evolution and lifetime // Solar Phys. 2010. V. 267. P. 63–73.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск