

устойчивыми интенсивными вихрями. Полученный результат дает основание использовать для оценок интенсификации вихревых образований параметр k^2 , связывающий минимум давления с максимумом скорости ветра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Тараканов Г. Г. Тропическая метеорология. Л., 1980. [2] Мамедов Э. С., Павлов Н. И. Тайфуны. Л., 1974. [3] Алексеев В. В., Александров А. А., Лаппо С. С. // Изв. АН СССР, ФАО. 1969. 5, № 2. С. 204—207. [5] Риль Г. Климат и погода в тропиках. Л., 1984. [6] Радикович В. М., Тараканов Г. Г. // Метеорология и гидрология. 1979. № 1. С. 41—45. [7] Deissler R. G. // J. Atm. Sci. 1977. 34, N 10. P. 1502—1507. [8] McBride J. Atm. Sci. paper. 1979, N 308. [9] Мартыненко О. Г. и др. Препринт № 25 ИТМО АН БССР. Минск, 1984. [10] Сноу Г. // Интенсивные атмосферные вихри / Под ред. Л. Бенгтссона и Дж. Лайтхилла. М., 1985. С. 298—312. [11] Hoescker W. H. // Month. Weath. Rev. 1960. 88. P. 167—180.

Поступила в редакцию
07.04.86

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1987. Т. 28, № 4

АСТРОНОМИЯ

УДК 523.745:523.76

О СПЕКТРЕ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ МАГНИТНЫХ СТРУКТУР НА СОЛНЦЕ

Н. Н. Контор
(НИИЯФ)

Введение. Представление о тонкоструктурности солнечного магнитного поля, т. е. о том, что оно состоит из отдельных волокон, возникло после того, как пространственное разрешение магнитографов стало приближаться к $1''$ (см., например, [1]). Затем это представление укрепились [2] и в настоящее время является широко распространенным (см., например, [3—7]). Многочисленные мелкомасштабные образования на Солнце, обусловленные магнитными полями, стали рассматриваться как пучки, или кластеры [6], магнитных элементов [2]. Несмотря на сложность наблюдаемой картины, а в ряде случаев и противоречивость данных наблюдений, стала пробивать дорогу привлекательная своей простотой и общностью концепция единой тонкоструктурной магнитогидродинамической природы солнечных магнитных полей (см., например, [5]).

Если допустить, что в основе этой концепции лежит единый механизм генерации солнечных магнитных полей (наиболее вероятным нам представляется механизм «интерфейсного» динамо [6]), то естественным результатом «работы» этого механизма должно быть существование единого спектра локальных магнитных структур на Солнце (так мы будем называть упомянутые выше мелкомасштабные образования в солнечной атмосфере). С целью показать, что имеющиеся наблюдательные данные не противоречат представлению об едином спектре локальных магнитных структур (ЛМС), в настоящей работе анализируются результаты наблюдений различных видов ЛМС на Солнце.

Виды ЛМС на Солнце и их параметры. На Солнце (с помощью различных методик) обнаружено четыре вида ЛМС, а именно: активные области [8, с. 61] (см. также солнечные пятна [8, с. 79]); эфемер-

Таблица 1

Вид ЛМС	Наблюдаемые проявления ЛМС	Уровень наблюдения ЛМС	Оценки средних значений параметров совокупностей ЛМС						S* (е. п.)	dN _p /dS* (сут. · е. п. · кв. попл.) ⁻¹
			S _m (е. п.)	T (сут.)	Φ _m (ТВб)	N _H (кв. попл.) ⁻¹	N _p (сут. · кв. попл.) ⁻¹	S*		
Активные области (АО)	ДАО	Хромосфера	3,0 · 10 ¹	6,0 · 10 ¹	1,0 · 10 ²	—	2,9 · 10 ⁻¹	1,5	1,3 · 10 ⁻¹	
	КАО3	»	7,0	1,5 · 10 ¹	—	—	3,0 · 10 ⁻¹	3,5 · 10 ⁻¹	8,6 · 10 ⁻¹	
	Солнечные пятна	Фотосфера	2,0 · 10 ⁻¹	5,0	1,0 · 10 ¹	—	—	2,0 · 10 ⁻¹	—	
Эфемерные области (ЭО)	КАО2	Хромосфера	2,0	3,0	1,0 · 10 ¹	—	1,3	1,0 · 10 ⁻¹	1,3 · 10 ¹	
	КАО1	»	1,0	1,0	—	—	2,7	5,0 · 10 ⁻²	5,5 · 10 ¹	
	ЭО	»	2,7 · 10 ⁻¹	5,0 · 10 ⁻¹	3,0 · 10 ⁻¹	4,0 · 10 ²	8,1 · 10 ²	1,4 · 10 ⁻²	5,8 · 10 ⁴	
Магнитные узлы	ЯРТ	Корона	3,0 · 10 ⁻¹	3,0 · 10 ⁻¹	3,0 · 10 ⁻¹	1,9 · 10 ²	5,5 · 10 ²	—	—	
	Поры	Фотосфера	1,2 · 10 ⁻²	5,0 · 10 ⁻¹	1,4 · 10 ⁻¹	—	—	1,2 · 10 ⁻²	—	
	Магнитные узлы	»	2,6 · 10 ⁻³	4,2 · 10 ⁻²	8,0 · 10 ⁻²	1,0 · 10 ⁵	2,5 · 10 ⁶	2,6 · 10 ⁻³	9,6 · 10 ⁸	
Магнитные элементы (МЭ)	Микропоры	»	1,4 · 10 ⁻³	1,0 · 10 ⁻²	1,6 · 10 ⁻²	—	—	1,4 · 10 ⁻³	—	
	Узелки	Хромосфера	3,4 · 10 ⁻²	5,2 · 10 ⁻³	—	—	—	3,4 · 10 ⁻³	—	
	Спиккулы	»	2,6 · 10 ⁻³	5,2 · 10 ⁻³	—	2,9 · 10 ⁵	5,5 · 10 ⁷	2,6 · 10 ⁻⁴	2,1 · 10 ¹¹	
Магнитные элементы (МЭ)	Факельные точки	»	1,1 · 10 ⁻³	6,9 · 10 ⁻³	4,4 · 10 ⁻³	6,4 · 10 ⁵	9,2 · 10 ⁷	1,1 · 10 ⁻⁴	8,6 · 10 ¹¹	
	МЭ	Фотосфера	1,0 · 10 ⁻¹	3,5 · 10 ⁻³	3,0 · 10 ⁻³	2,2 · 10 ⁵	6,3 · 10 ⁷	1,0 · 10 ⁻⁴	6,3 · 10 ¹¹	

ные области [8, с. 63] (см. также поры [8, с. 78] и яркие рентгеновские точки [8, с. 57]); магнитные узлы [8, с. 76] (см. также микропоры [8, с. 78]); магнитные элементы [8, с. 29] (см. также факельные точки [8, с. 75], спиккулы [8, с. 42] и узелки [8, с. 40]). Совокупности ЛМС каждого вида могут быть охарактеризованы оценками средних значений параметров, из которых мы будем рассматривать наблюдаемую площадь (S_m , в максимуме развития ЛМС), время жизни ЛМС (T), выносимый магнитный поток (Φ_m , в максимуме развития ЛМС), а также число наблюдаемых (N_n или рождающихся (N_p) ЛМС. Кроме этого, будем учитывать временной ход числа наблюдаемых или рождающихся в единицу времени ЛМС (для каждого вида) в течение солнечного цикла.

В табл. 1 на основании данных и результатов, приведенных в [4, 8–17], собраны оценки средних значений перечисленных выше параметров совокупностей ЛМС для всех доступных анализу наблюдаемых проявлений ЛМС. Величина S_m измеряется в относительных единицах площади (1 е. п. = 10^{-4} площади видимой полусферы Солнца, т. е. $3,04 \cdot 10^8$ км²); T — в сутках; Φ_m — в геравеберах (10^{20} мкс); N_n и N_p — это соответственно число наблюдаемых и рождающихся в сутки ЛМС в «квадрате поверхности Солнца», ограниченном долготами $E60$ и $W60$ и широтами $N60$ и $S60$; его площадь равна 0,289 от площади поверхности Солнца; ДАО — это долгоживущие АО ($T \geq 27$ сут); КАО1, КАО2 и КАО3 — короткоживущие АО ($T < 27$ сут); ЯРТ — это яркие рентгеновские точки в короне (подробнее см. [17]).

Поскольку наблюдательные данные показывают, что магнитные поля заметно «расходятся» по мере подъема в хромосферу и переходную область [18; 19; 8, с. 75], мы попытались «свести» все наблюдаемые площади ЛМС к уровню фотосферы, уменьшив для этого площади ЛМС, наблюдаемых в хромосфере, в 10 раз (в соответствии с данными [18; 19; 8, с. 75]), а для биполярных ЛМС (ЭО и АО) — в 20 раз (S^*).

Плотность числа рождающихся ЛМС определялась из приближенного соотношения

$$\frac{dN_p}{dS^*} \approx \frac{N_p}{\Delta S} \approx \frac{N_n}{T \Delta S}, \quad (1)$$

где ΔS — оценка разброса площади ЛМС, принятая для ДАО равной $1,5S^*$ (исходя из анализа распределения ДАО по S_m [20]), а для всех остальных ЛМС — равной S^* .

Спектр ЛМС. По данным табл. 1 были построены зависимости $T(S^*)$; $\Phi_m(S^*)$; $N_n(S^*)$ и $\frac{dN_p}{dS^*}(S^*)$, т. е. спектр ЛМС по их размерам (см. рис. 1, 2). Совместный анализ рис. 1, 2 показывает, что все эти зависимости могут быть аппроксимированы степенными функциями с целыми показателями:

$$T = a_T S^*, \quad (2)$$

где $\lg a_T = 1,36 \pm 0,41$;

$$\Phi_m = a_\Phi S^*, \quad (3)$$

где $\lg a_\Phi = 1,51 \pm 0,32$;

$$N_n = a_N / S^*, \quad (4)$$

где $\lg a_N = 0,95 \pm 1,12$;

$$\frac{dN_p}{dS^*} = \frac{A_N}{(S^*)^3}, \quad (5)$$

где $\lg A_N = -0,53 \pm 1,18$.

Как видно из рис. 1, 2, при определении вида зависимостей (2) и (3) было принято, что наблюдаемые значения параметров могут отличаться от среднего в 2 раза, а для зависимостей (4) и (5) — в 3 раза, поскольку надежность оценок параметров не одинакова (наилучшая надежность для зависимостей (2) и (3), наихудшая — для зависимости (5)), что, конечно, обусловлено низкой надежностью оценок числа наблюдаемых ЛМС (4), особенно для магнитных узлов, КАО1 и

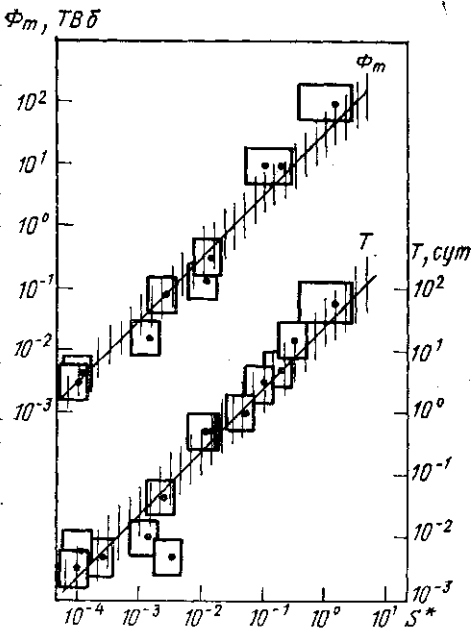


Рис. 1. Зависимости $T(S^*)$ и $\Phi_m(S^*)$ по данным табл. 1. Прямоугольники показывают оценки разброса величин из табл. 1 (точки). Вертикальные штрихи показывают разброс значений параметра в (2) и (3). Размерность S^* см. в тексте

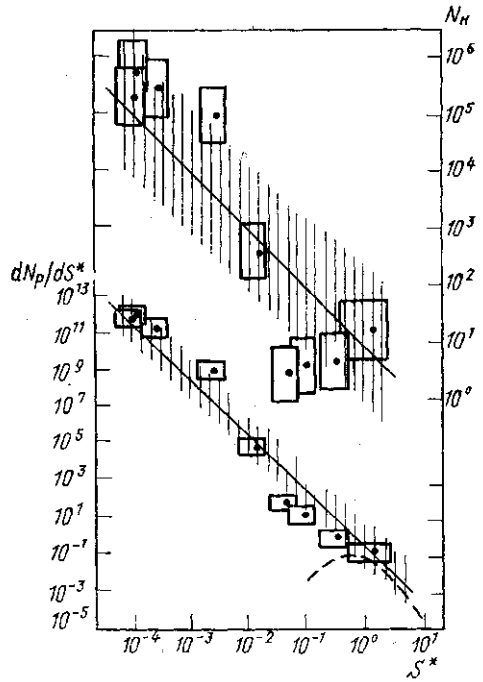


Рис. 2. Зависимость (4) числа наблюдаемых ЛМС (N_n) в «квадрате поверхности» (см. текст) от их «приведенной» площади S^* (верхняя прямая). Спектр ЛМС (5) по их размерам (см. табл. 1) (нижняя прямая). Прямоугольники и вертикальные штрихи — то же, что и на рис. 1. Пунктир — распределение ДАО по S^* для 1981 г.

КАО2. Вследствие этого оценка параметра в выражениях (2) и (3) справедлива с точностью до множителя 2–3, а в (4) и (5) — с точностью до множителя 10 и более. Учитывая большие погрешности в оценках параметров распределений ЛМС (особенно в соотношениях (4) и (5)), приближенный характер соотношения (1), а также широкий диапазон изменения переменных (для S^* он составляет около 5 порядков, а для dN_p/dS^* — около 14 порядков), выражения (2)–(5) следует рассматривать как грубую аппроксимацию данных наблюдений, которая может служить лишь указанием на существование универсальных

связей между всеми наблюдаемыми видами ЛМС (см. введение). С этих позиций можно попытаться вывести некоторые следствия из соотношений (2)–(5). Так, соотношение (3) показывает, что средняя напряженность магнитного поля всех видов ЛМС одинакова и составляет $\bar{B} = (1,07_{-0,56}^{+1,15}) \cdot 10^3$ Гс, т. е. около 1 кГс. Этот результат можно объяснить как следствие того, что все ЛМС состоят из плотноупакованных магнитных элементов (см. табл. 1). Положив площадь одного МЭ равной $f_s = 10^{-4}$ е. п., получим

$$S^* = f_s n_f, \quad (6)$$

где n_f — число МЭ, составляющих данную ЛМС, и

$$\Phi_m = f_\Phi n_f, \quad (7)$$

где $f_\Phi = a_\Phi f_s = 3,24 \cdot 10^9$ Вб — магнитный поток, выносимый одним МЭ (ср. с табл. 1). Используя (6) и (7), можно записать (2) в виде

$$T = \frac{a_T f_s}{f_\Phi} \Phi_m = \frac{f_T}{f_\Phi} \Phi_m, \quad (8)$$

откуда следует, что время жизни ЛМС пропорционально выносимому ею магнитному потоку. Если пренебречь временем роста ЛМС по отношению ко времени ее распада и предположить, что распад ЛМС происходит с постоянной скоростью, что не противоречит наблюдениям [2, с. 94; 7, с. 221], получим

$$\left| \frac{d\Phi}{dt} \right| = \frac{f_\Phi}{f_T}, \quad (9)$$

где f_T — среднее время жизни магнитного элемента, равное 3,3 мин. Сравнивая (9) с результатом диффузионного приближения для распада солнечных пятен [5, с. 399], получим $\tilde{\eta} = f_s / (4\pi f_T) = 1,22 \cdot 10^7$ м²/с, что дает разумное значение коэффициента турбулентной магнитной диффузии $\tilde{\eta}$. Таким образом, распад ЛМС происходит так, как будто она теряет в течение каждого интервала времени f_T по одному из составляющих ее магнитных элементов.

Из вида зависимости (4) следует, что мощность генерации солнечного магнитного поля (в течение промежутков времени около 1 года) приблизительно постоянна. Действительно, общее число магнитных элементов N_f , составляющее все ЛМС с площадью S^* , оказывается одинаковым для любой $S^* = f_s n_f$:

$$N_f = N_n n_f = a_N / f_s = \text{const.}$$

Тогда на один свободный магнитный элемент в среднем приходится площадь $S_0 = [S] f_s / a_N$, где $[S]$ — площадь «квадрата поверхности Солнца» (см. выше). При образовании ЛМС с площадью S^* магнитные элементы как бы собираются с площади $S_0 n_f$, откуда следует, что наблюдаемое число таких ЛМС

$$N_n = \frac{[S]}{S_0 n_f} = \frac{a_N}{S^*}.$$

(см. (4)). Отсюда с учетом (1) сразу получаем выражение (5) для спектра ЛМС, где $A_N = a_N / a_T$.

Выводы. Все данные по различным видам ЛМС, собранные в табл. 1, могут быть грубо аппроксимированы выражениями (2)–(5),

которые рассматриваются нами как указание на существование единого механизма генерации солнечных магнитных полей.

С помощью этих выражений, исходя из концепции единой тонкоструктурной магнитогидродинамической природы солнечных магнитных полей, можно оценить параметры магнитного элемента (см. соотношения (3), (6)–(8) и табл. 2); описать процесс распада ЛМС (см. со-

Таблица 2

Параметр	Обозначение параметра	Единица измерения	Оценка величины параметра		
			минимальная	средняя	максимальная
Площадь поперечного сечения	f_S	10^4 км^2	1,5	3,0	4,5
Время жизни	f_T	мин	1,3	3,3	8,5
Магнитный поток	f_Φ	10^{17} мкс	1,6	3,2	6,8
Магнитная индукция	B_f	10^3 Гс	0,51	1,1	2,2

отношение (9)); установить, что механизм генерации солнечного магнитного поля в конвективной зоне, по-видимому, характеризуется приблизительно постоянной мощностью, т. е. приблизительно постоянным числом генерируемых магнитных элементов, из которых образуется совокупность ЛМС с площадью S^* (в течение промежутков времени около 1 года).

Основной вывод состоит в том, что все виды ЛМС на Солнце, по-видимому, образуют единый степенной спектр с плотностью

$$\frac{dN_p}{dn_f} \approx \frac{A_f}{n_f^3}, \quad (10)$$

где $A_f = \frac{3a_N}{a_T f_S^2} \approx 10^8$ магнитных структур, рождающихся в сутки на поверхности Солнца в единичном интервале числа магнитных элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Северный А. Б. // Астрон. журн. 1965. 42, № 2. С. 217–232. [2] Стенфлю Дж. О. // Проблемы солнечной активности / Под ред. В. Бумбы и И. Клечека. М., 1979. С. 75–120. [3] Паркер Е. Космические магнитные поля. М., 1982. [4] The Sun as a Star / Ed. S. Jordan NASA SP-450, 1981. [5] Прист Э. Р. Солнечная магнитогидродинамика. М., 1985. [6] Spruit H. C., Roberts V. // Nature. 1983. 304, N 5925. P. 401–406. [7] Обридко В. Н. Солнечные пятна и комплексы активности. М., 1985. [8] Солнечная и солнечно-земная физика / Под ред. А. Брудека, Ш. Дюрана. М., 1980. [9] Solar-Geophys. Data (Regions of Solar Activity). U. S. Department of Commerce (Boulder Col., USA, 80303). 1969–1981. P. 1. [10] Harvey K. L., Harvey L. W., Martin S. F. // Solar. Phys. 1975. 40. P. 87–102. [11] Martin S. F., Harvey K. L. // Ibid. 1979. 64. P. 93–108. [12] Roussel-Dupre R. et al. // Astrophys. J. 1984. 278. P. 428–440. [13] Golub L., Krieger A. S., Vaiana G. S. // Solar. Phys. 1976. 49. P. 79–90. [14] Golub L., Davis J. M., Krieger A. S. // Astrophys. J. 1979. 229. P. L145–L150. [15] Davis J. M. // Solar. Phys. 1983. 88. P. 337–342. [16] Golub L., Rosner R., Vaiana G. S., Weiss N. O. // Astrophys. J. 1981. 243. P. 309–316. [17] Контор Н. Н. Деп. ВИНТИ № 5865-83. М., 1983. [18] Simon G. W., Noyes R. W. // Solar Magnetic Fields. IAU Symp. N 43, Dordrecht, Reidel, 1971. P. 663–666. [19] Frazier E. N., Stenflo J. O. // Solar Phys. 1972. 27. P. 330–346. [20] Контор Н. Н., Любимов Г. П., Хотилова Т. Г., Заборова Е. П. // Изв. АН СССР, сер. физ. 1976. 40, № 3. С. 478–483.

Поступила в редакцию
20.03.86