

УДК 523.98

**С. И. Гопасюк, О. С. Гопасюк**

НИИ «Крымская астрофизическая обсерватория»  
98409 Крым, п. Научный

### **Динамические явления в активных областях Солнца**

*Исследовано влияние растяжения магнитной петли с продольным электрическим током на изменение в ней электрического тока и его магнитной энергии. Электродинамические силы всегда направлены таким образом, что они способствуют увеличению индуктивности магнитной петли — ее растяжению. Скорость растяжения магнитной петли зависит от величины запасенного в ней электрического тока. Работа этих сил затрачивается на увеличение кинетической энергии плазмы. Увеличение длины магнитной петли приводит к уменьшению тока и его магнитной энергии. Магнитная энергия токов включает механическую работу электродинамических сил, выделение джоулева тепла и работу сторонних электродвижущих сил. Наибольшая часть расходуемой магнитной энергии при растяжении магнитной петли приходится на механическую работу электродинамических сил.*

*ДИНАМІЧНІ ЯВИЩА В АКТИВНИХ ОБЛАСТЯХ НА СОНЦІ, Гопасюк С. І., Гопасюк О. С. — Досліджено вплив розтягнення магнітної петлі з поздовжнім електричним струмом на зміну в ній електричного струму та його магнітної енергії. Електродинамічні сили завжди направлені таким чином, що вони сприяють збільшенню індуктивності магнітної петлі — її розтягненню. Швидкість розтягнення магнітної петлі обумовлюється величиною накопиченого в ній електричного струму. Робота цих сил витрачається на збільшення кінетичної енергії плазми. Збільшення довжини магнітної петлі призводить до зменшення струму та його магнітної енергії. Магнітна енергія струму включає в себе механічну роботу електродинамічних сил, виділення джоулевого тепла та роботу сторонніх електрорушійних сил. Найбільша частина витраченої магнітної енергії при розтягненні магнітної петлі припадає на механічну роботу електродинамічних сил.*

*DYNAMICS PHENOMENA IN ACTIVE REGIONS ON THE SUN, by Gopasyuk S. I., Gopasyuk O. S. — The influence of the magnetic loop stretching with a longitudinal electric current on the change of the electric current and its magnetic energy is studied. The electrodynamic forces in the magnetic loop are always directed so that they increase its inductance, namely, they stretch the magnetic loop. The velocity of the magnetic loop stretching depends on the electric current value. The work of these forces spends for increasing the plasma kinetic energy. Increasing the magnetic loop length decreases of the current and its magnetic energy. The magnetic energy of*

*electric currents includes the mechanical work of electrodynamical forces, Joule heating and the work of exterior electromotive forces. The most part of the consumable magnetic energy is expended for the mechanical work of the electrodynamical forces.*

Формирование активной области происходит в результате выхода магнитных потоков на поверхность Солнца. Положение о подъеме магнитного поля на поверхность Солнца и в последующем его погружение вглубь было обосновано в [9]. В настоящее время есть две концепции формирования магнитных полей активной области (АО). В одной из них [12] предполагается, что концентрация магнитного поля, вышедшего на поверхность, происходит под действием потоков фотосферной плазмы. Во многом она соответствует наблюдениям. Многие явления, в том числе и эволюцию магнитного поля на стадии формирования АО, хорошо описывает феноменологическая модель, развитая в работах [14—16]. Согласно этой модели активная область образуется в результате выхода на поверхность скрученных магнитных жгутов, состоящих из отдельных магнитных волокон. С переходом в верхние слои магнитные жгуты расщепляются на тонкие волокна, которые отходят от основного жгута на разные расстояния. Наблюдаемый процесс концентрации магнитного поля — кажущегося втекания магнитных элементов поля в пятно той же полярности — является следствием выхода такого магнитного жгута в фотосферу. Подъем магнитных полей в верхние слои атмосферы обусловлен плавучестью магнитных петель как более легких образований [13]. Исходя из того, что непрерывная конвекция вдоль магнитных силовых линий, проходящих через поверхность Солнца, невозможна, в работе [8] было сделано предположение, что магнитное поле останавливает конвекцию — основной источник переноса энергии. Остановка конвекции приводит к охлаждению поверхностных слоев плазмы, сжатию магнитного поля и образованию пятна [13]. Пятно становится видимым как темное образование, когда напряженность поля в нем достигает не менее 150 мТл [6].

В магнитных петлях текут электрические токи [2, 5, 11]. Наличие электрических токов в фотосфере АО впервые было доказано наблюдениями [5] и там же показано, что эти токи квазистационарны. Величина плотности тока в отдельных петлях достигает  $5 \cdot 10^4$  А/км<sup>2</sup> [2].

Ниже мы исследовали процессы, связанные с выходом на поверхность магнитных петель в активных областях Солнца, растягивание магнитных петель и влияние этого растягивания на развитие АО.

#### ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ СИЛА

Электродинамическая сила наряду с конвекцией, силами плавучести [13] и силами центрифуги [3, 10], вероятно, является приоритетной в выносе магнитного поля на поверхность Солнца. Особенно важную роль электродинамическим силам следует отводить в растягивании вышедших на поверхность магнитных петель. Линейные размеры поперечного сечения магнитных петель обычно малы по сравнению с их длиной. Это позволяет отождествить магнитные петли с линейными проводниками. Магнитная петля, в которой течет ток, стремится увеличить свой радиус кривизны. Это является следствием общего правила, согласно которому электродинамические силы в системе проводников всегда направлены таким образом, что они стремятся увеличить индуктивность системы. Выражение для обобщенной электродинамической силы, стремящейся изменить геометрическую конфигурацию проводника, имеет вид [1]

$$F_l = \frac{I^2}{2} \frac{\partial L}{\partial l}, \quad (1)$$

где  $I$  — сила тока в контуре,  $L$  — коэффициент самоиндукции контура,  $l$  — геометрический параметр, который изменяется под действием силы. Если магнитную петлю принять за окружность радиуса  $r$ , то результирующая сила, стремящаяся увеличить  $r$ , равна

$$F_r = \frac{I^2}{2} \frac{\partial L}{\partial r}. \quad (2)$$

В стратифицированной атмосфере действие этой силы приводит к вытягиванию магнитной петли в направлении меньшего давления. При постоянной и однородной величине магнитной проницаемости  $\mu$  токового контура и окружающей плазмы коэффициент самоиндукции [7]

$$L = 4\pi\mu r \left( \ln \frac{8r}{d} - 2 \right) + \pi\mu r, \quad (3)$$

где  $d$  — поперечный размер сечения магнитной петли. Согласно (3) коэффициент самоиндукции определяется геометрической конфигурацией контура петли и является мерой энергии магнитного поля токов. Индуктивность токового контура зависит и от  $\mu$ . В дальнейшем принято  $\mu = 1$ .

Выражения (1) и (2) показывают, что при всех прочих равных условиях электродинамическая сила тем больше, чем больше в магнитной петле полный электрический ток. Кроме того, давление плазмы внутри магнитной петли создает силу, направленную на растяжение петли, т. е. на увеличение ее длины. Силы растяжения магнитной петли могут быть уравновешены, в частности, если магнитная петля находится во внешнем магнитном поле, силовые линии которого перпендикулярны к плоскости петли [1]. На Солнце такие случаи маловероятны. А это значит, что на Солнце нет не растягивающихся со временем магнитных петель, если только в них течет электрический ток.

#### РАСТЯЖЕНИЕ МАГНИТНОЙ ПЕТЛИ

Скорость растягивания магнитной петли определяется величиной запасенного в ней электрического тока. Поэтому для понимания эволюции магнитных петель очень важно знать величину токов в них. Работа электродинамических сил магнитного поля токов равна [7]

$$F_l dl = \frac{I^2}{2} dL. \quad (4)$$

Работа, представленная выражением (4), затрачивается на увеличение кинетической энергии плазмы в петле. За исключением [11], ранее не принималось во внимание влияние изменения длины магнитной петли на изменение электрического тока в ней. Геометрия петель рассматривалась только с точки зрения создания условий, необходимых для пересоединения силовых линий магнитного поля, например во время вспышки. Процесс изменения электрических токов в магнитных полях в хромосфере и короне связывался с перемещением магнитных структур на уровне фотосферы в горизонтальной плоскости. В действительности роль изменения длины петель в изменении тока велика.

До тех пор, пока длина магнитной петли по каким-то причинам остается неизменной, индуктивность электрического контура постоянна, она не влияет на циркулирующий в нем стационарный ток. Установим изменение электрического тока, циркулирующего в магнитной петле, за счет

изменения ее индуктивности, т. е. увеличения ее длины. Предположим, что часть магнитной петли возвышается над фотосферой, а ее основания находятся в более глубоких слоях. Мы принимаем, что в этих слоях находится источник сторонней электродвижущей силы (ЭДС) магнитной токовой петли. Уравнение, которое описывает токовый контур со сторонней ЭДС  $U$ , током  $I$ , самоиндукцией  $L$  и активным сопротивлением  $R$ , имеет вид [7]

$$\frac{d}{dt}(IL) + IR = U. \quad (5)$$

Активное сопротивление равно

$$R = \frac{l}{S}\rho, \quad (6)$$

где  $l$ ,  $S$  и  $\rho$  — длина, поперечное сечение и удельное сопротивление магнитной петли соответственно.

В случае, который мы допускаем, коэффициент самоиндукции  $L$  определяется геометрической конфигурацией контура. Мы также предполагаем, что величина сторонней ЭДС  $U$  остается постоянной даже в случае движения токовых структур — петель.

Активное сопротивление (6) и коэффициент самоиндукции (3) пропорциональны геометрической длине магнитной петли. По мере выхода магнитной петли в верхние слои солнечной атмосферы плазма в магнитной петле охлаждается. Как следствие этого наряду с растяжением магнитной петли увеличивается удельное сопротивление ее плазмы. Растяжение магнитной петли и изменение электрического тока в ней будут порождать плазменные неустойчивости. В результате удельное сопротивление плазмы будет также увеличиваться, так что в общем случае отношение  $R/L$  является функцией времени.

#### ИЗМЕНЕНИЕ МАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ ТОКОВ

Нами предприняты исследования, чтобы на простой модели представить явления, сопровождающие процесс растяжения магнитной петли, вдоль которой течет ток. Поэтому при решении уравнения (5) мы ограничились приближением, когда удельное сопротивление плазмы остается постоянным. В этом случае на основании выражений (3) и (6) приближенно имеем

$$\frac{R}{L} = \frac{R_0}{L_0} = \text{const}, \quad (7)$$

в отдельности  $R \neq R_0$  и  $L \neq L_0$ .

В соответствии с условием (7) решение уравнения (5) имеет вид

$$IL = \left( I_0 L_0 - \frac{L_0}{R_0} U \right) e^{-Rt/L} + \frac{L}{R} U. \quad (8)$$

Индекс «0» относится к значениям параметров контура тока в момент времени  $t = 0$ .

Величина  $IL$  равна потоку магнитной индукции, посылаемому током  $I$  через свой собственный контур тока. На основании (8) поток магнитной индукции уменьшается со временем от начального значения  $(I_0 L_0 - UL_0/R_0)$  до нуля подобно уменьшению тока при выключении источника ЭДС постоянного тока. Это происходит тем быстрее, чем больше отношение  $R/L$ . С другой стороны, можно видеть, что выражение (8) описывает как бы два процесса, во время которых поток магнитной индукции  $IL$  изменяется

подобно току  $I$  при включении и выключении электрической цепи постоянного тока. При выключении цепи ( $U = 0$ ) ток (или поток магнитной индукции) уменьшается со временем от начального значения  $I_0$  (или  $I_0 L_0$ ) до нуля со скоростью, соответствующей величине  $R/L$ . При замыкании цепи (начального тока и потока индукции нет:  $I_0 = 0$ ;  $I_0 L_0 = 0$ ) ток (или поток индукции) увеличивается, стремясь к асимптотическому значению  $U/R_0$  (или  $UL/R$ ) тем быстрее, чем больше отношение  $R/L$ .

Из выражения (8) следует, что  $IL = I_0 L_0$  при  $I_0 = U/R_0$ . Это означает, что поток индукции через изменяющийся контур не изменяется  $\frac{d}{dt}(IL) = 0$ , а следовательно, ЭДС индукции равна нулю. Это соответствует случаю полной вмороженности магнитного поля в плазму, что формально отвечает требованию  $R = 0$ . При  $R \neq 0$  производная  $\frac{d}{dt}(IL) \neq 0$ .

Введем обозначение  $U/R_0 = aI_0$ , где  $0 < a < 1$ . После этого выражение (8) принимает вид

$$IL = I_0 L_0 f(t), \quad (9)$$

где

$$f(t) = a + (1 - a)e^{-Rt/L}. \quad (10)$$

Функция  $f(t)$  определяет вклад постоянной  $a$  и переменной  $(1 - a)e^{-Rt/L}$  составляющих тока в общем балансе полного тока. Величина, на которую изменяется магнитная энергия токов в процессе растяжения магнитной петли с током, с учетом выражения (9) принимает вид

$$-\Delta W = \frac{I_0^2 L_0}{2} \left( \frac{L_0}{L} f^2(t) - 1 \right). \quad (11)$$

Скорость изменения магнитной энергии (11) равна

$$-\frac{d}{dt}\Delta W = -\frac{I_0^2 L_0^2}{2L^2} f^2(t) \frac{dL}{dt} - \frac{I_0^2 L_0^2}{L} f(t)(1 - a) \frac{R}{L} e^{-Rt/L}. \quad (12)$$

Магнитная энергия токов включает в себя несколько составляющих, перечисленных ниже.

1. Механическая работа  $dA/dt$  электродинамических сил (1), которые определяют кинетическую энергию движения плазмы в магнитной петле:

$$\frac{dA}{dt} = F_1 \frac{dl}{dt} = \frac{I_0^2 L_0^2}{2L^2} f^2(t) \frac{dL}{dt}. \quad (13)$$

Она создает неустойчивости плазмы и явления, связанные с ними. Наиболее масштабными являются магнитогидродинамические неустойчивости. Энергетическим резервуаром для раскачки этих неустойчивостей служит энергия магнитного поля тока, текущего вдоль магнитной петли [4]. Они связаны с макроскопическим перемещением больших участков плазмы.

2. Выделение джоулева тепла  $dQ/dt$  в контуре тока (преодоление сопротивления в токовом контуре):

$$\frac{dQ}{dt} = I^2 R = I_0^2 \frac{R}{L} \frac{L_0^2}{L} f^2(t). \quad (14)$$

3. Работа сторонних ЭДС:

$$\frac{dP}{dt} = -UI = -I_0^2 \frac{R}{L} \frac{L_0^2}{L} a f(t). \quad (15)$$

В приведенных выражениях оставлено отношение  $R/L$ , чтобы подчеркнуть, что в отдельности  $R$  и  $L$  переменные.

Сравнение выражений (13), (14) и (15) показывает, что основная часть расходуемой магнитной энергии при растяжении петли приходится на механическую работу электродинамических сил. Она и определяет кинетическую энергию плазмы.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Изменение магнитной энергии со временем при увеличении геометрических размеров индуктивности связано с уменьшением токов — электрические токи изменяются. В однородном квазилинейном проводнике переменный ток, в отличие от постоянного, распределяется неравномерно по сечению проводника. По мере изменения ток начинает концентрироваться на поверхности магнитной петли, и тем сильнее, чем больше скорость изменения тока. Концентрация тока на поверхности влечет за собой изменение самоиндукции и сопротивления проводника. В результате коэффициент самоиндукции определяется первым слагаемым в выражении (3), площадь слоя  $S$ , по которому течет ток, уменьшается, и активное сопротивление увеличивается (выражение (6)).

За характерное время изменения электрического тока принято время, в течение которого происходит растяжение магнитной петли. Это позволило оценить толщину слоя в сечении магнитной петли, по которому течет основная часть тока.

Нам достоверно не известна величина удельного сопротивления плазмы в петле. Но наблюдаемые быстрые изменения магнитных полей и электрических токов [2, 3, 17], получаемые из наблюдений даже с не очень высоким пространственным разрешением, дают основание полагать, что оно значительно больше того, которое вытекает из теории парных столкновений.

Были проведены расчеты электрических токов и изменений магнитной энергии. Вычисления выполнены при значениях параметров, приведенных в таблице.

Мы приняли, что та часть магнитной петли, которая возвышается над фотосферой, представляет собой полуокружность. Длина ее изменяется со временем:

$$l = l_0 + Vt,$$

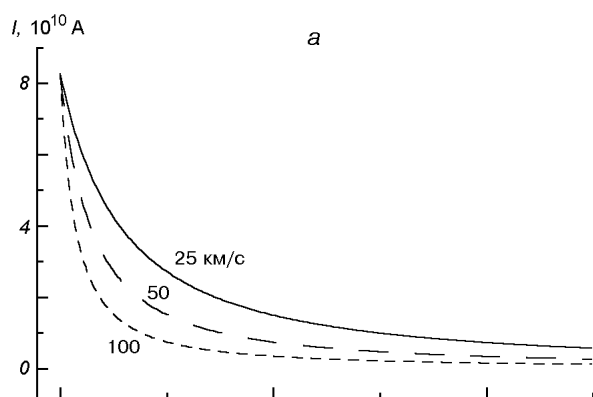
где  $l_0$  — длина петли в момент времени  $t = 0$  и  $V$  — скорость растяжения длины петли. Диаметр поперечного сечения петли принят постоянным вдоль длины и равным  $d = 2000$  км.

На рисунке (а) представлено изменение со временем полного тока  $I$ , вычисленного на основании выражений (9) и (10). Видно, что с увеличением времени растяжения петли величина полного тока уменьшается. Параметром, который существенно влияет на изменение тока  $I$ , является скорость  $V$  растяжения магнитной петли. Чем больше скорость растяжения, тем быстрее уменьшается полный ток.

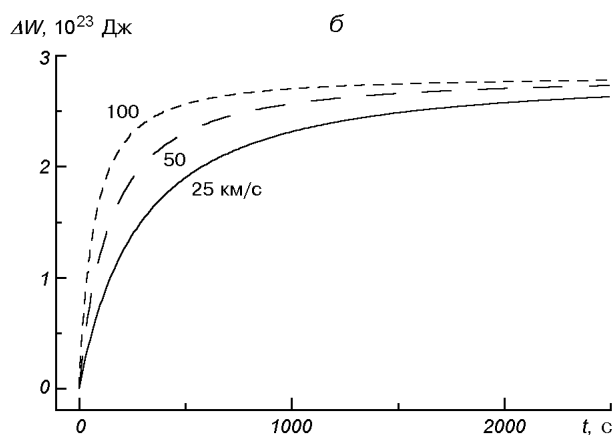
Изменения магнитной энергии токов  $\Delta W$  (рисунок б) были вычислены по выражениям (11) и (10). Видно, что с увеличением времени растяжения

Значения параметров, использованных при расчетах

$j_0, 10^4$ А/км <sup>2</sup>	$\rho, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$a$	$V, \text{ км/с}$	$t, 10^3$ с
0.1	9.00	0.1	25	0.5
1.0	0.90	0.5	50	1.0
10.0	0.09	0.7	100	5.0



Изменение со временем полного тока (а) и величины уменьшения магнитной энергии токов (б) для значений  $V = 25, 50$  и  $100$  км/с. Плотность тока  $j_0 = 10^5$  А/км<sup>2</sup>, удельное сопротивление плазмы  $\rho = 9.0$  Ом·м и  $a = 0.7$



магнитной петли убыль магнитной энергии токов  $\Delta W$  увеличивается. При этом, чем меньше скорость растяжения, тем медленнее идет процесс изменения  $\Delta W$ . Величины удельного сопротивления плазмы  $\rho$  и  $a$  — доли тока, связанной с диффузией, — слабо влияют, по сравнению со скоростью  $V$ , на величину изменения полной энергии. При этом увеличение удельного сопротивления  $\rho$  и параметра  $a$  приводит к более быстрому уменьшению магнитной энергии токов.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано влияние растяжения магнитной петли с продольным током на изменение тока и его магнитной энергии. Электродинамические силы всегда направлены таким образом, что они стремятся увеличить индуктивность системы — растянуть магнитную петлю с током. Скорость растяжения магнитной петли зависит от величины запасенного в ней электрического тока. Работа этих сил затрачивается на увеличение кинетической энергии плазмы в петле. Показано, что увеличение геометрических размеров индуктивности токового контура — длины магнитной петли с током — приводит к уменьшению тока в петле. В результате магнитная энергия токов уменьшается. Убыль магнитной энергии токов включает механическую работу электродинамических сил, выделение джоулева тепла в контуре тока (магнитной петле) и работу сторонней ЭДС. Механическая работа электродинамических сил определяет кинетическую энергию движения плазмы в магнитной петле. Она создает неустойчивости плазмы и явления, связанные с ними. Наиболее масштабными являются магнитогидродинами-

ческие неустойчивости. Энергетическим резервуаром для раскачки этих неустойчивостей служит энергия магнитного поля тока, текущего вдоль петли. Они связаны с макроскопическим перемещением больших участков плазмы.

По мере изменения ток начинает концентрироваться на поверхности магнитной петли, и тем сильнее, чем больше скорость изменения тока. Переменный ток, в отличие от постоянного, распределяется неравномерно по сечению проводника. Концентрация тока на поверхности влечет за собой изменение самоиндукции и сопротивления проводника — удельное сопротивление проводника увеличивается. Раскачка неустойчивости плазмы приводит также к увеличению ее удельного сопротивления.

Были проведены вычисления электрических токов и изменений магнитной энергии. Величина полного тока в петле уменьшается с увеличением времени растяжения петли (рисунок *a*). На изменение тока существенно влияет скорость растяжения петли — чем больше скорость растяжения, тем меньше ток. Влияние параметра *a* и удельного сопротивления  $\rho$  практически не сказывается на изменении полного тока. Как видно из рисунка *b*, убыль магнитной энергии токов со временем увеличивается. При этом скорость растяжения магнитной петли сильно влияет на ход зависимости  $\Delta W$  от времени. Изменение  $\Delta W$  происходит тем быстрее, чем больше скорость растяжения. Увеличение удельного сопротивления  $\rho$  и параметра *a* приводит к более быстрому уменьшению магнитной энергии токов. Однако влияние этих величин на изменение магнитной энергии токов невелико.

1. Арцимович Л. А. Управляемые термоядерные реакции. — М.: Физматгиз, 1961.—468 с.
2. Гопасюк С. И. Структура и динамика магнитного поля в активных областях на Солнце. — М.: ВИНТИ, 1987.—С. 6—77.—(Итоги науки и техники. Сер. Астрономия; Т. 34).
3. Гопасюк С. И. Магнитные поля Солнца и звезд // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1998.—94.—С. 98—109.
4. Кадомцев Б. Б. Коллективные явления в плазме.—М.: Наука, 1976.—238 с.
5. Северный А. Б. Исследования магнитного поля и электрических токов униполярных солнечных пятен // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1965.—33.—С. 34—79.
6. Стещенко Н. В. Магнитные поля мелких солнечных пятен и пор // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1967.—37.—С. 21—28.
7. Тамм И. Е. Основы теории электричества. — М.: ГИТТЛ, 1956.—620 с.
8. Biermann L. Der gegenwartige Stand der Theorie konvektiver Sonnenmodelle // Vierteljahrsh. Astron. Gesellsch.—1941.—76.—P. 194—200.
9. Cowling T. G. The growth and decay of the sunspot magnetic field // Mon. Not. Roy. Astron. Soc.—1946.—106, N 3.—P. 218—224.
10. Gopasyuk S. I. Velocity field and some aspects of solar activity // Proc. 10th European Regional Astronomy Meeting of the IAU, August 24—29, 1987. Vol. 1. The Sun / Eds L. Heina, M. Sobotka. — Praha, 1987.—P. 137—145.—(Publ. Astron. Inst. Czec., N 66).
11. Gopasyuk S. I. Filling of magnetic loops by an electric current // Solar coronal structures: IAU colloq. N 144 / Eds V. Rusin, P. Heinzel, J. C. Vial. — Bratislava: VEDA Publ. Company, 1994.—P. 211—213.
12. Leighton R. B. Transport of magnetic fields on the Sun // Astrophys. J.—1964.—140, N 4.—P. 1547—1562.
13. Parker E. N. The formation of sunspots from the solar toroidal field // Astrophys. J.—1955.—121, N 2.—P. 491—507.
14. Piddington J. H. Solar magnetic fields and convection. I: Active regions and sunspots // Astrophys. Space Sci.—1975.—34, N 2.—P. 347—362.
15. Piddington J. H. Solar magnetic fields and convection. IV: Magnetic flux ropes and their fibres // Astrophys. Space Sci.—1976.—40, N 1.—P. 73—90.
16. Piddington J. H. The flux-rope-fibre theory of solar magnetic fields // Astrophys. Space Sci.—1978.—55, N 2.—P. 401—425.
17. Simon G. W., Wilson P. R. Flux changes in small magnetic regions. II. Further observations and analysis // Astrophys. J.—1985.—295, N 1.—P. 241—257.