

# **О равновесии и устойчивости корональных электрических токов**

Б. П. Филиппов

ИЗМИРАН

# Бессиловое магнитное поле (поле с продольными токами)

$$\operatorname{rot} \mathbf{B} = \alpha \mathbf{B}$$

## EQUILIBRIUM AND STABILITY OF FORCE-FREE MAGNETIC FIELD

M. M. MOLODENSKY

*Laboratory of Solar Activity of the Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radiowave Propagation, Academy of Sciences, Moscow, U.S.S.R.*

(Received 2 October 1973; revised 18 February, 1974)

**Abstract.** Force-free magnetic fields (*f.f.f.*) are considered as the first approximation of magnetic hydrodynamic equations in the case when the energy of the field exceeds the thermal energy of the medium. Such a relation of energies takes place in the upper atmosphere of the Sun in active regions.

The consequence of the virial theorem obtained shows that for any solution of the corresponding non-linear system of equations only two cases are possible: either the total energy of the field is given by a divergent integral, or in some regions the force-free character of field is destroyed. This permits the conclusion that it is impossible to build *f.f.* current systems everywhere, and therefore 'boundary' problems for this type of fields are of the same importance as for harmonic fields.

Integral relations are obtained which are the necessary conditions for the solution of boundary problems. According to the classical principle of Thompson the harmonic fields are always stable, while *f.f.f.* may be stable or unstable.

It is shown that: (1) arbitrary *f.f.f.* are stable to small changes of boundary conditions; (2) among *f.f.f.* the hydrodynamically stable configurations exist.

The hydrodynamic stability condition restricts the size of force-free currents in such configurations.

## EQUILIBRIUM AND STABILITY OF THE FORCE-FREE MAGNETIC FIELD

II. *Stability*

M. M. MOLODENSKY

*The Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radiowave Propagation, Academy of Sciences, Moscow, U.S.S.R.*

(Received 25 February, 1975)

**Abstract.** The exact limit of stability of force-free fields for the case  $\alpha = \text{const}$  and spherical region of the disturbances is obtained.

The stable fields of active regions must be close to the harmonical ones for length scales which are less than the linear dimensions of spots.

## EQUILIBRIUM AND STABILITY OF THE FORCE-FREE MAGNETIC FIELD III

M. M. MOLODENSKY

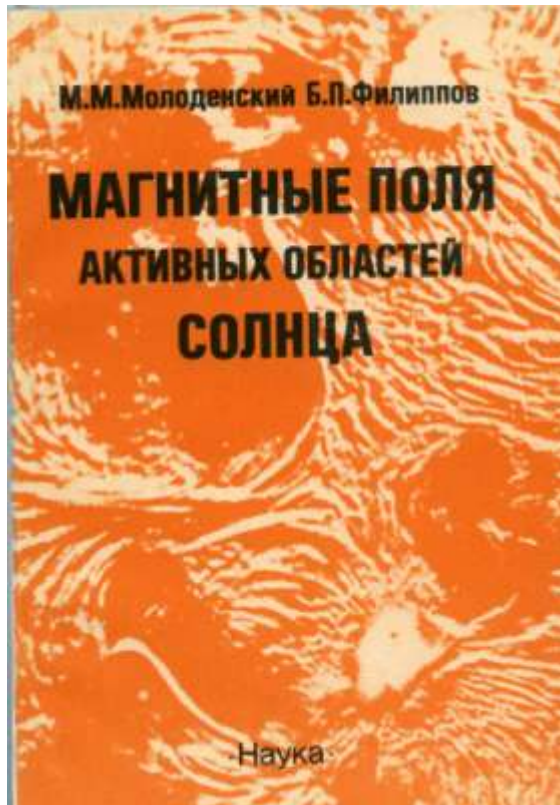
*Laboratory of Solar Activity of the Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radiowave Propagation, Academy of Sciences, Moscow, USSR*

(Received 10 September, 1975; in revised form 29 April, 1976)

**Abstract.** The condition of stability obtained earlier is generalized for the case of arbitrary force-free fields (*f.f.f.*). It is shown that the configurations are stable, if the ratio of the current to the field and its gradient are small enough.

# Бессиловое магнитное поле (поле с продольными токами)

$$\text{rot } \mathbf{B} = \alpha \mathbf{B}$$



## EQUILIBRIUM AND STABILITY OF FORCE-FREE MAGNETIC FIELD

M. M. MOLODENSKY

*Laboratory of Solar Activity of the Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radiowave Propagation, Academy of Sciences, Moscow, U.S.S.R.*

(Received 2 October 1973; revised 18 February, 1974)

**Abstract.** Force-free magnetic fields (*f.f.f.*) are considered as the first approximation of magnetic hydrodynamic equations in the case when the energy of the field exceeds the thermal energy of the medium. Such a relation of energies takes place in the upper atmosphere of the Sun in active regions.

The consequence of the virial theorem obtained shows that for any solution of the corresponding non-linear system of equations only two cases are possible: either the total energy of the field is given by a divergent integral, or in some regions the force-free character of field is destroyed. This permits the conclusion that it is impossible to build *f.f.* current systems everywhere, and therefore 'boundary' problems for this type of fields are of the same importance as for harmonic fields.

Integral relations are obtained which are the necessary conditions for the solution of boundary problems. According to the classical principle of Thompson the harmonic fields are always stable, while *f.f.f.* may be stable or unstable.

It is shown that: (1) arbitrary *f.f.f.* are stable to small changes of boundary conditions; (2) among *f.f.f.* the hydrodynamically stable configurations exist.

The hydrodynamic stability condition restricts the size of force-free currents in such configurations.

## EQUILIBRIUM AND STABILITY OF THE FORCE-FREE MAGNETIC FIELD

II. *Stability*

M. M. MOLODENSKY

*The Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radiowave Propagation, Academy of Sciences, Moscow, U.S.S.R.*

(Received 25 February, 1975)

**Abstract.** The exact limit of stability of force-free fields for the case  $\alpha = \text{const}$  and spherical region of the disturbances is obtained.

The stable fields of active regions must be close to the harmonical ones for length scales which are less than the linear dimensions of spots.

## EQUILIBRIUM AND STABILITY OF THE FORCE-FREE MAGNETIC FIELD III

M. M. MOLODENSKY

*Laboratory of Solar Activity of the Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radiowave Propagation, Academy of Sciences, Moscow, USSR*

(Received 10 September, 1975; in revised form 29 April, 1976)

**Abstract.** The condition of stability obtained earlier is generalized for the case of arbitrary force-free fields (*f.f.f.*). It is shown that the configurations are stable, if the ratio of the current to the field and its gradient are small enough.

# Электрические токи в протуберанцах

УДК 523.98

МОЛОДЦЕНКО М. М., ФЕЛИЦКОЕ С. П.  
БЫСТРОЕ ДВИЖЕНИЕ ВОЛОКОН В СОЛНЕЧНЫХ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ

Рассмотрены теоретически возможные виды видовой структуры фотосферы звезды, для которой движется ядро протуберанца, движущаяся область Пондера. Показано, если магнитное поле является не вертикальным, а горизонтальным (то есть движется в направлении экватора) или радиальным (вдоль радиуса звезды), то в области видовой структуры протуберанца может наблюдаться перемена конфигурации. Показано, что конфигурация видовой структуры для области протуберанца зависит от центра Пондера. Показано, что видовой структура протуберанца в зависимости от центра Пондера может быть криволинейной, а это соответствует криволинейной оболочке криволинейной радиальной структуры магнитного поля в области видовой структуры Пондера. Показано, что криволинейная радиальная структура может существовать также в виде  $\sim 1/r^2$  или в виде радиальной структуры, которая является функцией от радиуса. Для каждого из рассмотренных случаев показано, как структура области видовой структуры протуберанца зависит от структуры видовой структуры звезды.

УДК 523.98

МОЛОДЦЕНКО М. М., ФЕЛИЦКОЕ С. П.  
БЫСТРОЕ ДВИЖЕНИЕ ВОЛОКОН В СОЛНЕЧНЫХ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ. II

Наконец рассмотрены возможные случаи движения видовой структуры в криволинейной области, для которой быстро движется область видовой структуры Пондера. Показано, что движение видовой структуры протуберанца зависит от структуры видовой структуры звезды. Показано, что видовой структура протуберанца может быть криволинейной, а это соответствует криволинейной оболочке криволинейной радиальной структуры магнитного поля в области видовой структуры Пондера. Показано, что криволинейная радиальная структура может существовать также в виде  $\sim 1/r^2$  или в виде радиальной структуры, которая является функцией от радиуса. Для каждого из рассмотренных случаев показано, как структура области видовой структуры протуберанца зависит от структуры видовой структуры звезды.

УДК 523.98

МОЛОДЦЕНКО М. М., ФЕЛИЦКОЕ С. П.  
БЫСТРОЕ ДВИЖЕНИЕ ВОЛОКОН В АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ. ИНТЕГРАЛЬНАЯ ФОРМА УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ

Рассмотрены возможные случаи движения видовой структуры фотосферы звезды, для которой движется ядро протуберанца, движущаяся область Пондера. Показано, если магнитное поле является не вертикальным, а горизонтальным (то есть движется в направлении экватора) или радиальным (вдоль радиуса звезды), то в области видовой структуры протуберанца может наблюдаться перемена конфигурации. Показано, что конфигурация видовой структуры для области протуберанца зависит от центра Пондера. Показано, что видовой структура протуберанца в зависимости от центра Пондера может быть криволинейной, а это соответствует криволинейной оболочке криволинейной радиальной структуры магнитного поля в области видовой структуры Пондера. Показано, что криволинейная радиальная структура может существовать также в виде  $\sim 1/r^2$  или в виде радиальной структуры, которая является функцией от радиуса. Для каждого из рассмотренных случаев показано, как структура области видовой структуры протуберанца зависит от структуры видовой структуры звезды.

УДК 523.745

МОЛОДЦЕНКО М. М., ФЕЛИЦКОЕ С. П.  
БЫСТРОЕ ДВИЖЕНИЕ ВОЛОКОН В АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ. ИНТЕГРАЛЬНАЯ ФОРМА УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ

Рассмотрены возможные случаи движения видовой структуры фотосферы звезды, для которой движется ядро протуберанца, движущаяся область Пондера. Показано, если магнитное поле является не вертикальным, а горизонтальным (то есть движется в направлении экватора) или радиальным (вдоль радиуса звезды), то в области видовой структуры протуберанца может наблюдаться перемена конфигурации. Показано, что конфигурация видовой структуры для области протуберанца зависит от центра Пондера. Показано, что видовой структура протуберанца в зависимости от центра Пондера может быть криволинейной, а это соответствует криволинейной оболочке криволинейной радиальной структуры магнитного поля в области видовой структуры Пондера. Показано, что криволинейная радиальная структура может существовать также в виде  $\sim 1/r^2$  или в виде радиальной структуры, которая является функцией от радиуса. Для каждого из рассмотренных случаев показано, как структура области видовой структуры протуберанца зависит от структуры видовой структуры звезды.

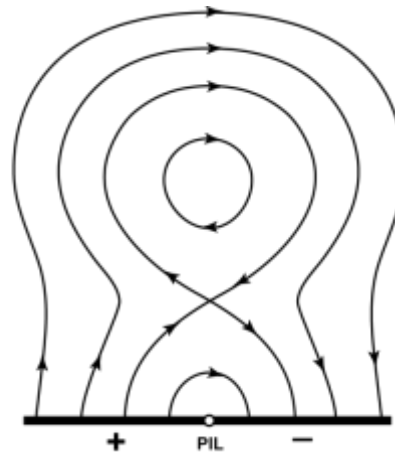
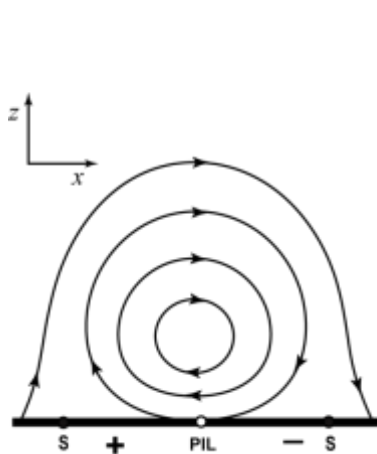


Kippenhahn & Schluter, 1957

Kuperus & Raadu, 1974

vanTend & Kuperus, 1978

# Условия равновесия электрического тока в короне



$$\frac{\partial \rho v_i}{\partial t} = -\frac{\partial \Pi_{ik}}{\partial x_k}$$

$$\Pi_{ik} = \rho v_i v_k + p \delta_{ik} - \frac{1}{4\pi} \left( B_i B_k - \frac{1}{2} B^2 \delta_{ik} \right)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (B_z^2 - B_x^2 - B_y^2) dx dy = 0 \quad \text{Molodensky, 1974}$$

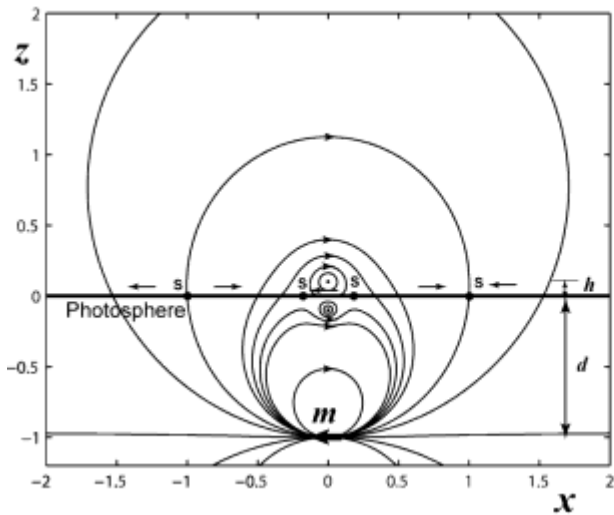
$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{b}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} b_x (2B_{0x} + b_x) dx = 0$$

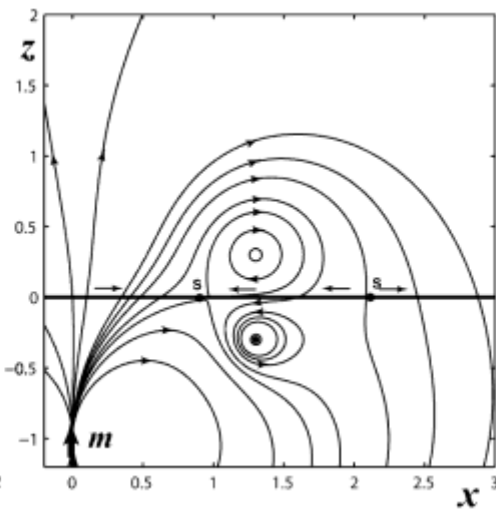
$$\int_{-\infty}^{\infty} b_x (B_{0x} + B_x) dx = 0$$

Molodenskii & Filippov, 1989

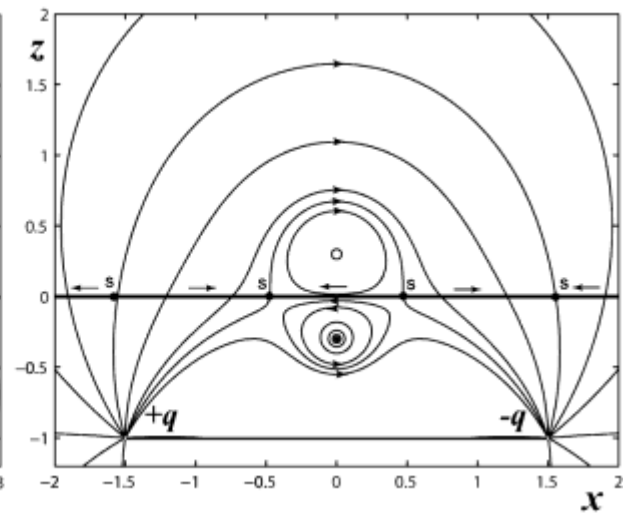
# Двумерные модели равновесия волокон



*Priest & Forbes, 1990*



*Molodenskii & Filippov, 1987*



*Filippov, 2013*

$$h \ll a$$

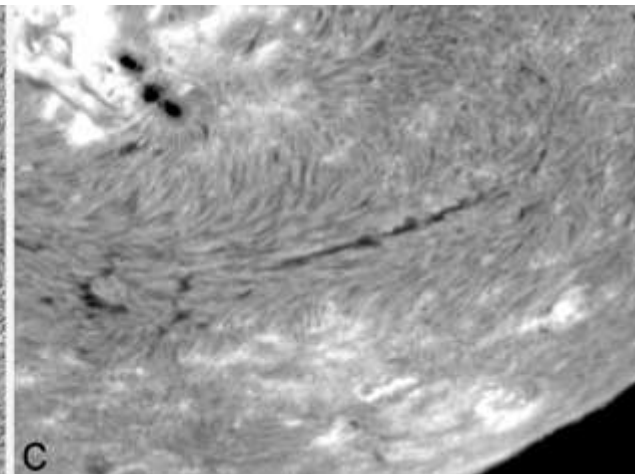
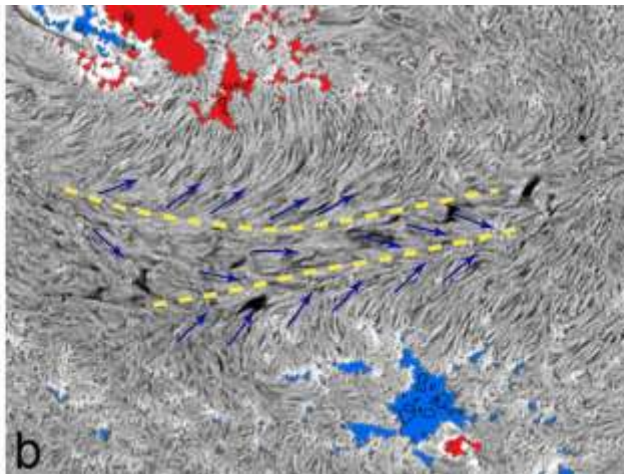
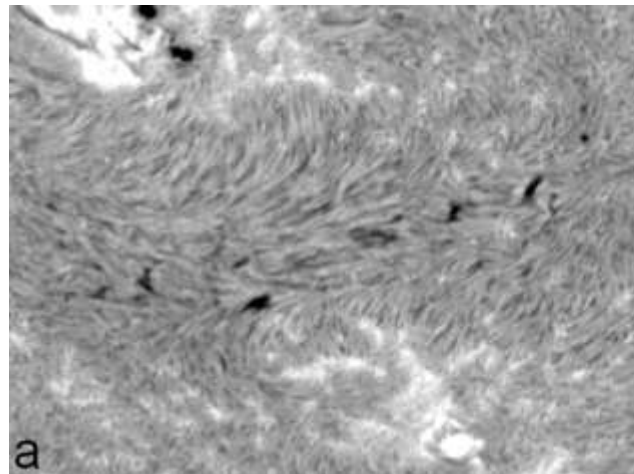
$$2x_s = 2\sqrt{3}h$$

# Структура хромосферы вблизи волокна

10 ноября 2001 г.

10 ноября 2001 г.

12 ноября 2001 г.



$$2x_s = 29M_M$$

$$h = 9M_M$$

$$2x_s = 2\sqrt{3}h$$

# Сепаратрисы в поле направлений фибрилл вблизи волокон

