



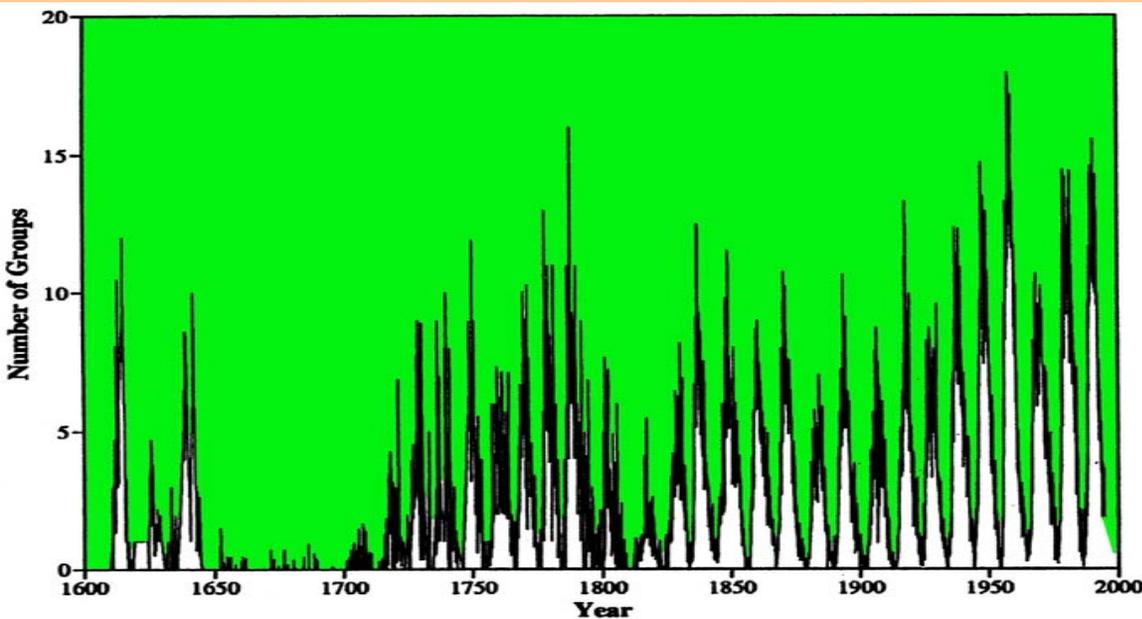
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ДИНАМО-ВОЛН В ДВУХСЛОЙНОЙ СРЕДЕ

Е. П. Попова¹, М. Е. Артюшкова², Д. Д. Соколов¹

¹ - МГУ, физический факультет

² - ИФЗ РАН

Зависимость числа пятен от года



Динамо Паркера

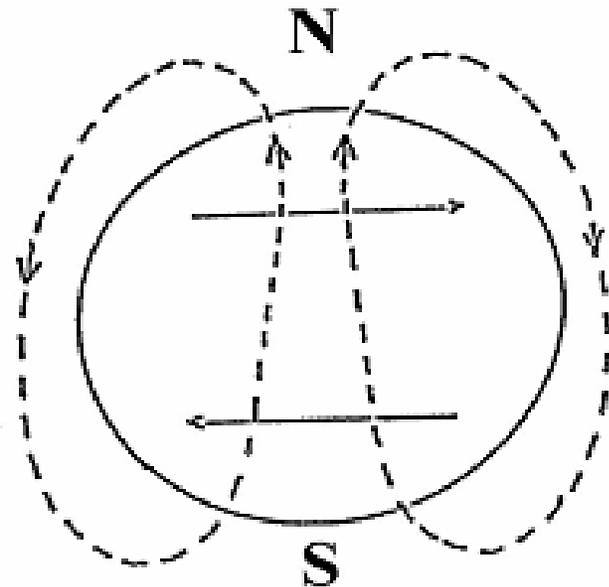
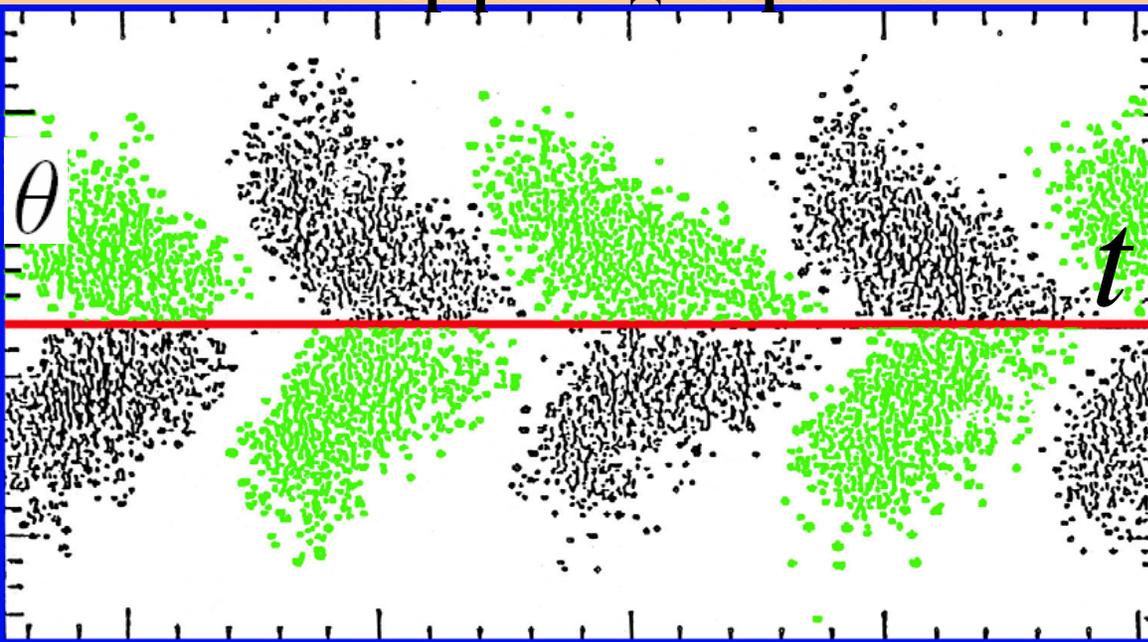
$$\mathbf{V}_P \xrightarrow{\Omega} \mathbf{V}_T$$

Дифференциальное вращение

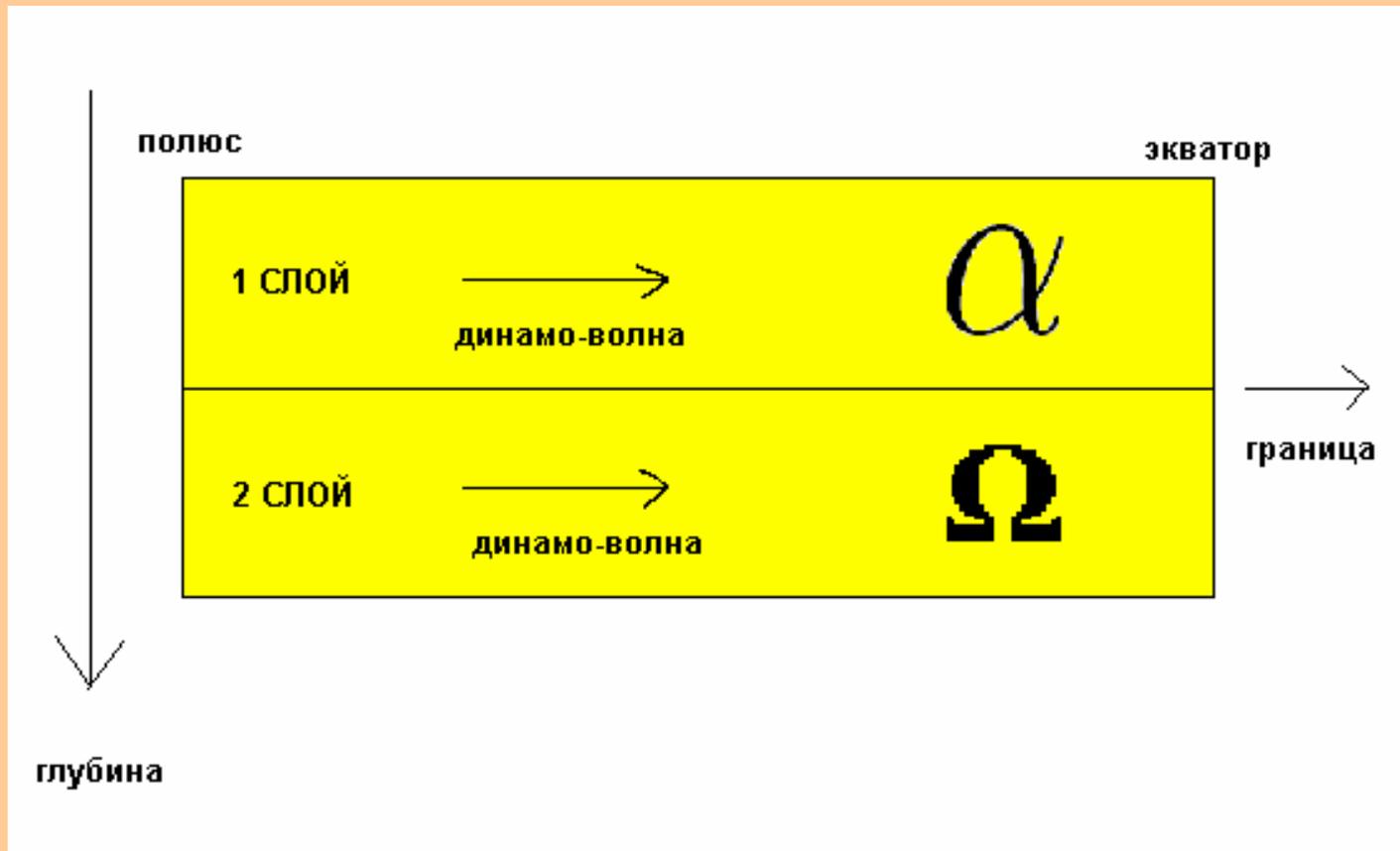
$$\mathbf{V}_T \xrightarrow{\alpha} \mathbf{V}_P$$

Спиральность

Баттерфляй-диаграмма



Двухслойная модель



Динамо Паркера в двухслойной среде

$$\begin{aligned}\frac{\partial B}{\partial t} &= \frac{\eta}{n} \Delta B, \\ \frac{\partial A}{\partial t} &= \alpha B + \frac{\eta}{n} \Delta A, \\ \frac{\partial b}{\partial t} &= D \cos \theta \frac{\partial a}{\partial \theta} + \Delta b, \\ \frac{\partial a}{\partial t} &= \Delta a.\end{aligned}$$

Граничные условия при $r = 0$:

$$\begin{aligned}b &= B, \\ a &= A, \\ \frac{\partial b}{\partial r} &= \frac{\eta}{n} \frac{\partial B}{\partial r}, \\ \frac{\partial a}{\partial r} &= \frac{\partial A}{\partial r}.\end{aligned}$$

Форма решения системы Паркера

$$B = \mu \cdot e^{iD^{\frac{1}{3}}S\theta + \gamma D^{\frac{2}{3}}t - iD^{\frac{1}{3}}m_1r},$$

$$A = (v + v_1r) \cdot e^{iD^{\frac{1}{3}}S\theta + \gamma D^{\frac{2}{3}}t - iD^{\frac{1}{3}}m_1r},$$

$$a = \zeta \cdot e^{iD^{\frac{1}{3}}S\theta + \gamma D^{\frac{2}{3}}t + iD^{\frac{1}{3}}m_2r},$$

$$b = (\chi + \chi_1r) \cdot e^{iD^{\frac{1}{3}}S\theta + \gamma D^{\frac{2}{3}}t + iD^{\frac{1}{3}}m_2r}.$$

Здесь $\gamma, v, v_1, \zeta, \chi, \chi_1, m_1, m_2$ - произвольные константы, а $S = \int kd\theta$.

Уравнение Гамильтона-Якоби

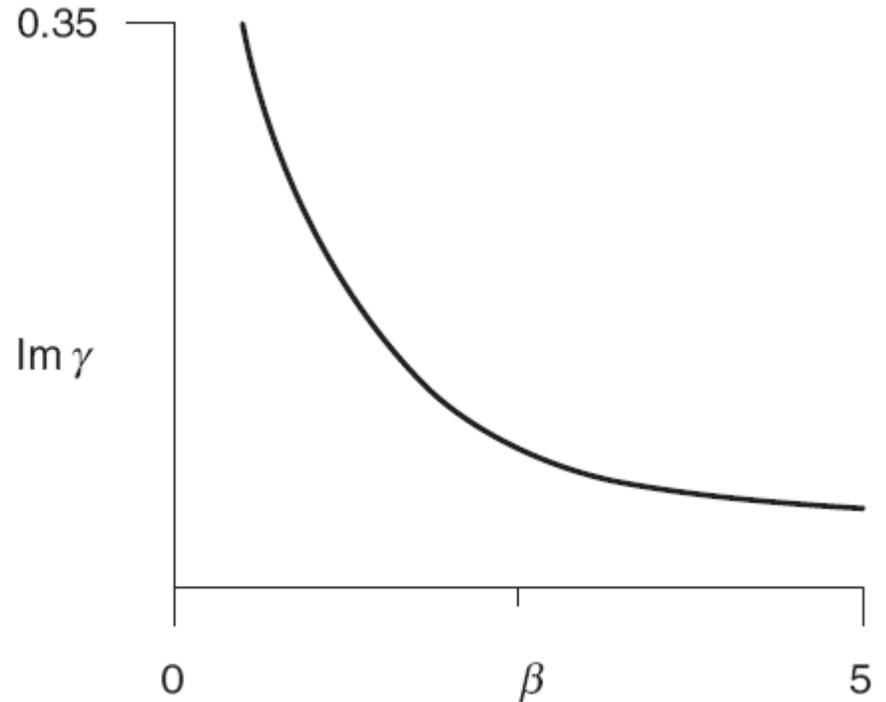
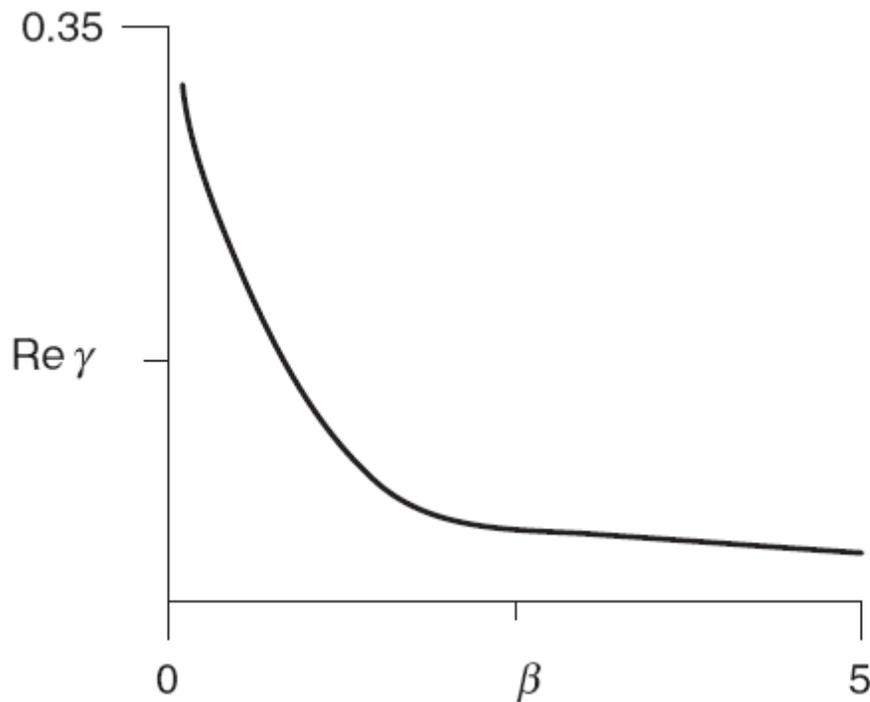
$$(\beta\sqrt{-\gamma/\beta - k^2} + \sqrt{-\gamma - k^2})(\sqrt{-\gamma/\beta - k^2} + \sqrt{-\gamma - k^2}) = -\frac{4\hat{\alpha}k}{i\beta\sqrt{-\gamma - k^2}\sqrt{-\gamma/\beta - k^2}}$$

содержит радикалы в отличие от однослойного случая

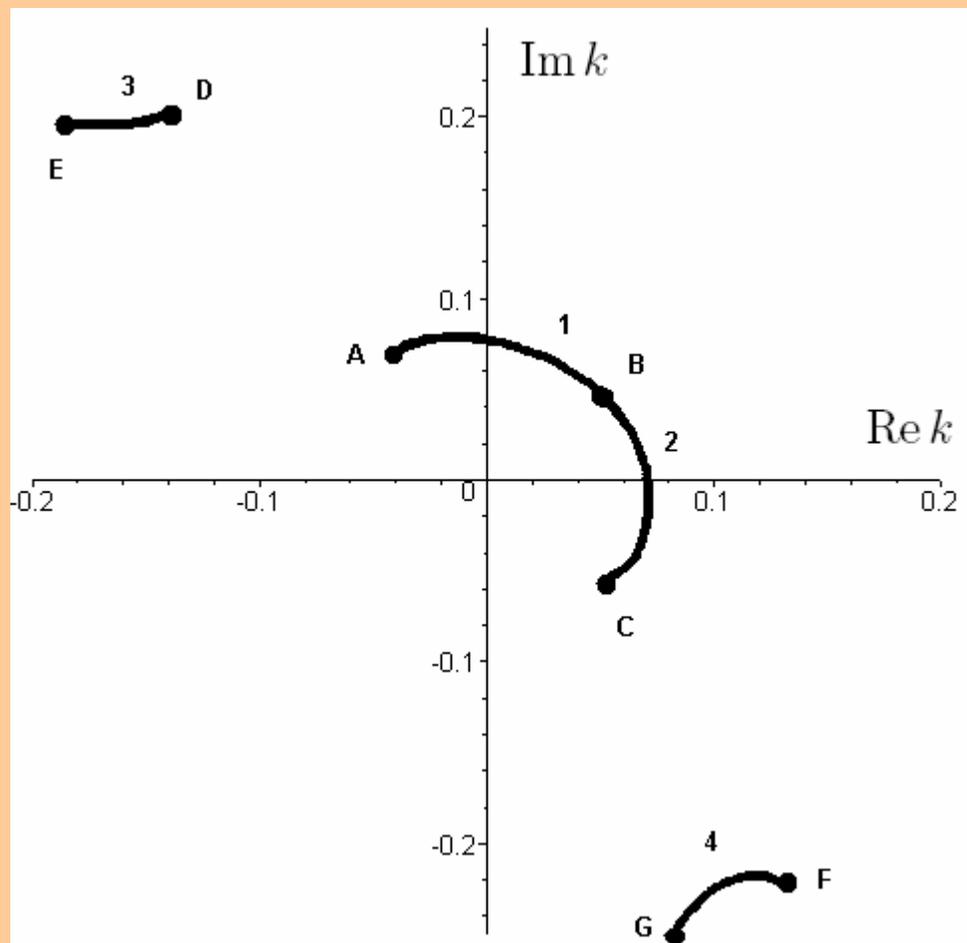
$$[\Gamma + k^2]^2 - ik\alpha \cos(\theta) = 0,$$

(однослойная задача: Кузанын, Соколов, 1995)

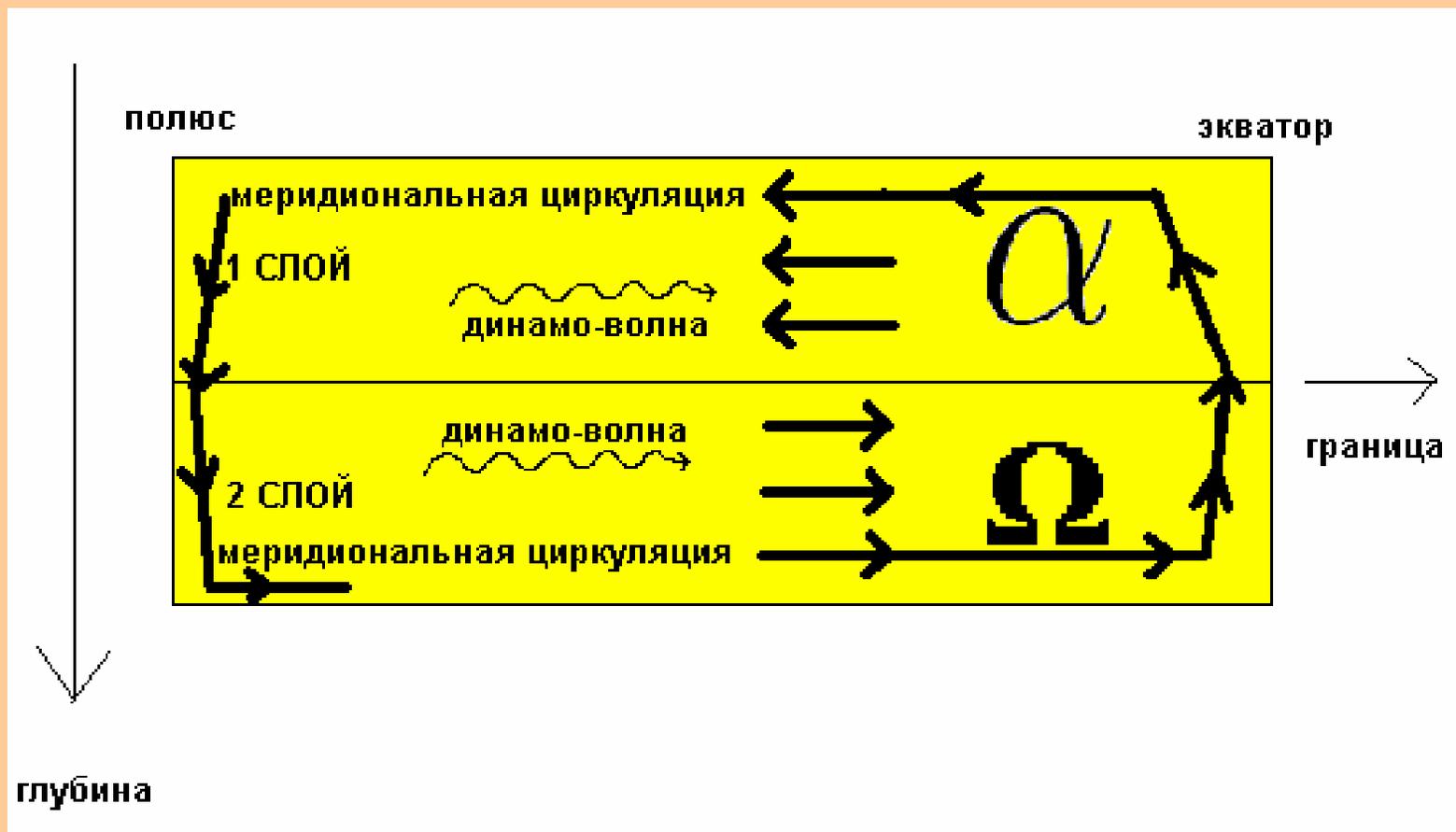
Скорость роста амплитуды магнитного поля и частота цикла в зависимости от соотношения коэффициентов турбулентной диффузии



Корневая диаграмма для случая $\beta=10$. Горизонтальной оси соответствует $Re k$, вертикальной оси соответствует $Im k$.



Двухслойная модель с меридиональной циркуляцией



Динамо в двухслойной среде с меридиональной циркуляцией

$$\begin{aligned}\frac{\partial B}{\partial t} + \frac{\partial(VB)}{\partial \theta} &= \beta \Delta B, & \frac{\partial A}{\partial t} + V \frac{\partial A}{\partial \theta} &= \alpha B + \beta \Delta A, \\ \frac{\partial b}{\partial t} + \frac{\partial(vb)}{\partial \theta} &= D \cos \theta \frac{\partial a}{\partial \theta} + \Delta b, & \frac{\partial a}{\partial t} + v \frac{\partial a}{\partial \theta} &= \Delta a,\end{aligned}$$

Граничные условия

$$b = B, \quad a = A, \quad \frac{\partial b}{\partial r} = \beta \frac{\partial B}{\partial r}, \quad \frac{\partial a}{\partial r} = \frac{\partial A}{\partial r}.$$

Уравнение Гамильтона-Якоби

$$\begin{aligned} & (\beta\sqrt{-(\gamma + iVk)/\beta - k^2} + \sqrt{-\gamma - iVk - k^2})(\sqrt{-(\gamma + iVk)/\beta - k^2} + \sqrt{-\gamma - iVk - k^2}) = \\ & = -\frac{4\hat{\alpha}k}{i\beta\sqrt{-\gamma - iVk - k^2}\sqrt{-(\gamma + iVk)/\beta - k^2}}. \end{aligned}$$

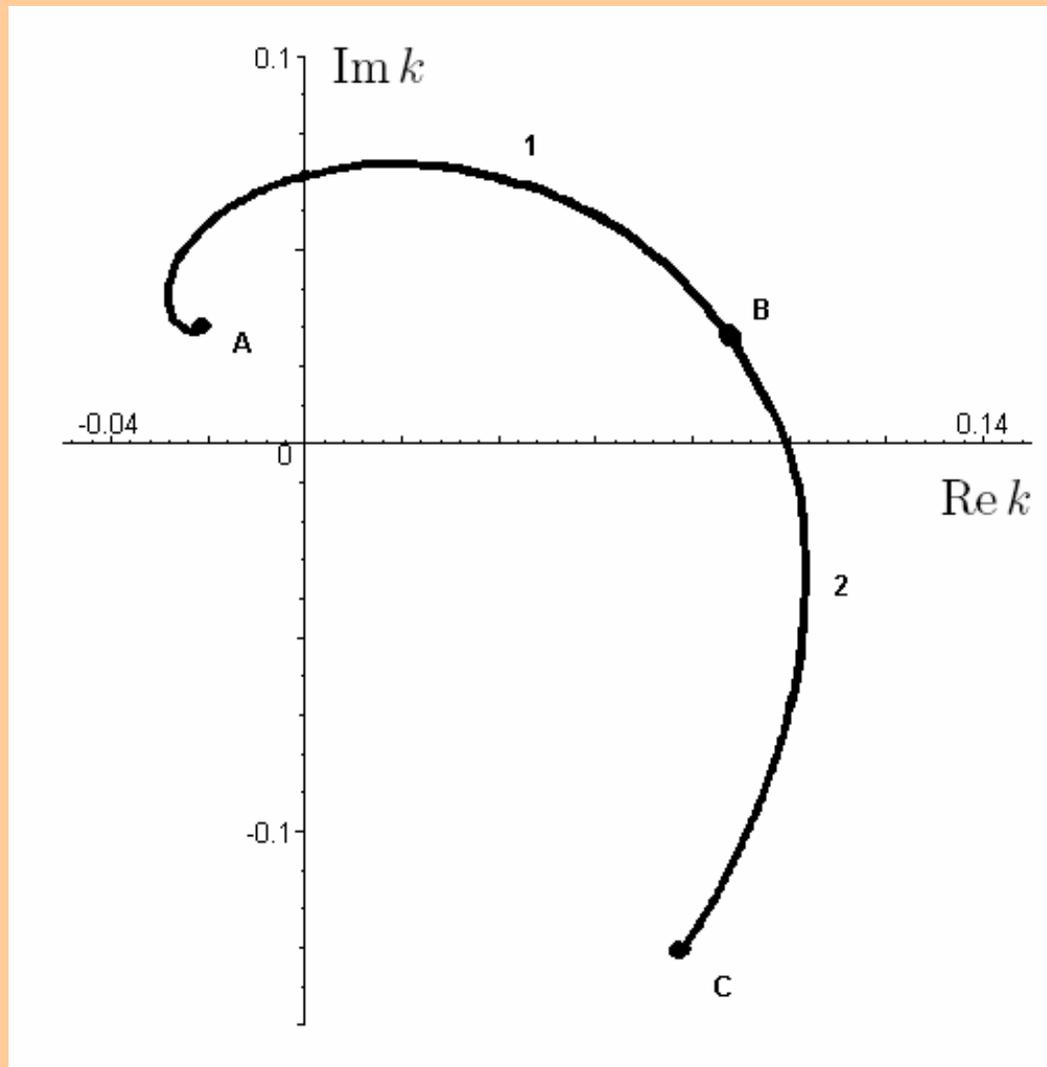
содержит радикалы в отличие от однослойного случая

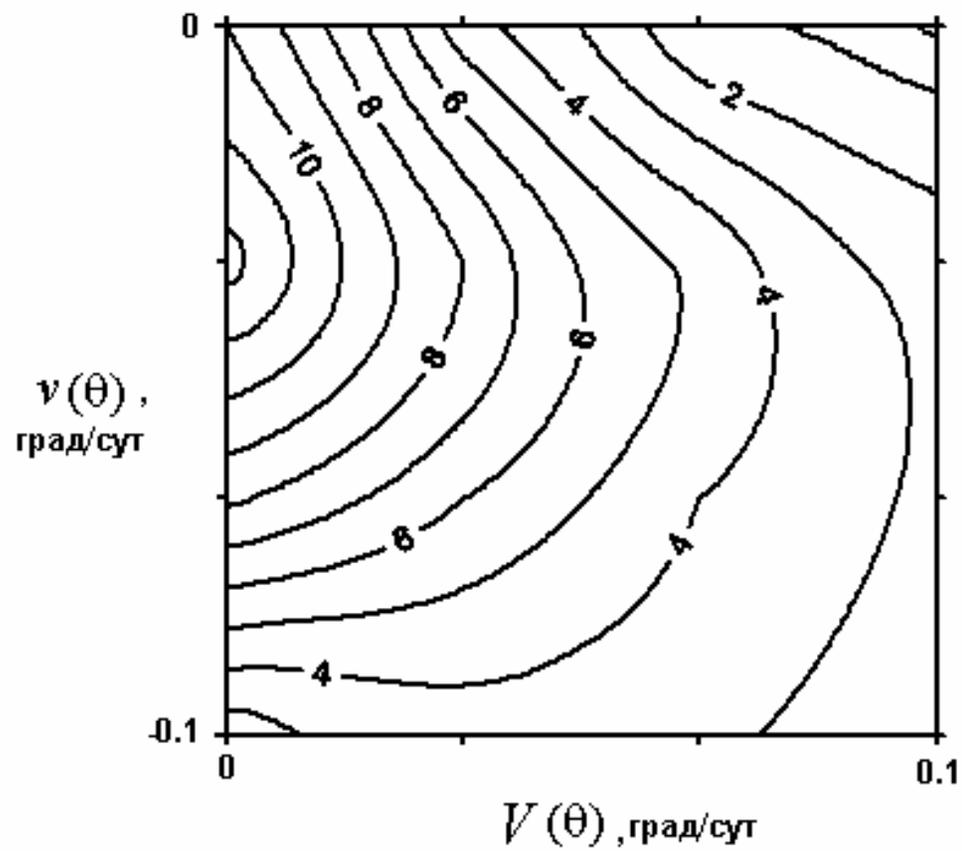
$$[\Gamma + ikv + k^2]^2 - ik\alpha \cos(\theta) = 0,$$

(однослойная задача: Попова и др., 2008)

Волновой-вектор k при $\beta = 1.5$, $V(\theta) = 0.1$ град/сут, $v(\theta) = -0.02$

град/сут. Величины $\text{Re } k$ и $\text{Im } k$ даны в безразмерных единицах.





Выводы

- Получено и исследовано уравнение Гамильтона-Якоби для двухслойной среды
- Длительность цикла увеличивается с ростом отношения коэффициентов турбулентной диффузии в различных слоях
- Длительность цикла увеличивается и при увеличении интенсивности меридиональных течений, и при увеличении разницы значений меридиональной циркуляции в слоях

Выводы

При значениях меридиональной циркуляции в пределах наблюдений для достижения длительности цикла 11 лет возможно отличие в физических параметрах слоев в несколько раз, а для достижения минимумов примерно в 10 раз.



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

The generation of large-scale magnetic field in stars.

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \text{rot} \alpha \mathbf{B} + \text{rot} [\mathbf{V} \times \mathbf{B}] + \beta \Delta \mathbf{B}$$

\mathbf{B} is the toroidal magnetic field

\mathbf{V} includes the meridional circulation and linear speed differential rotation

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}(\mathbf{r}) + r\Omega(r, \theta) \sin(\theta) \mathbf{e}_\varphi$$