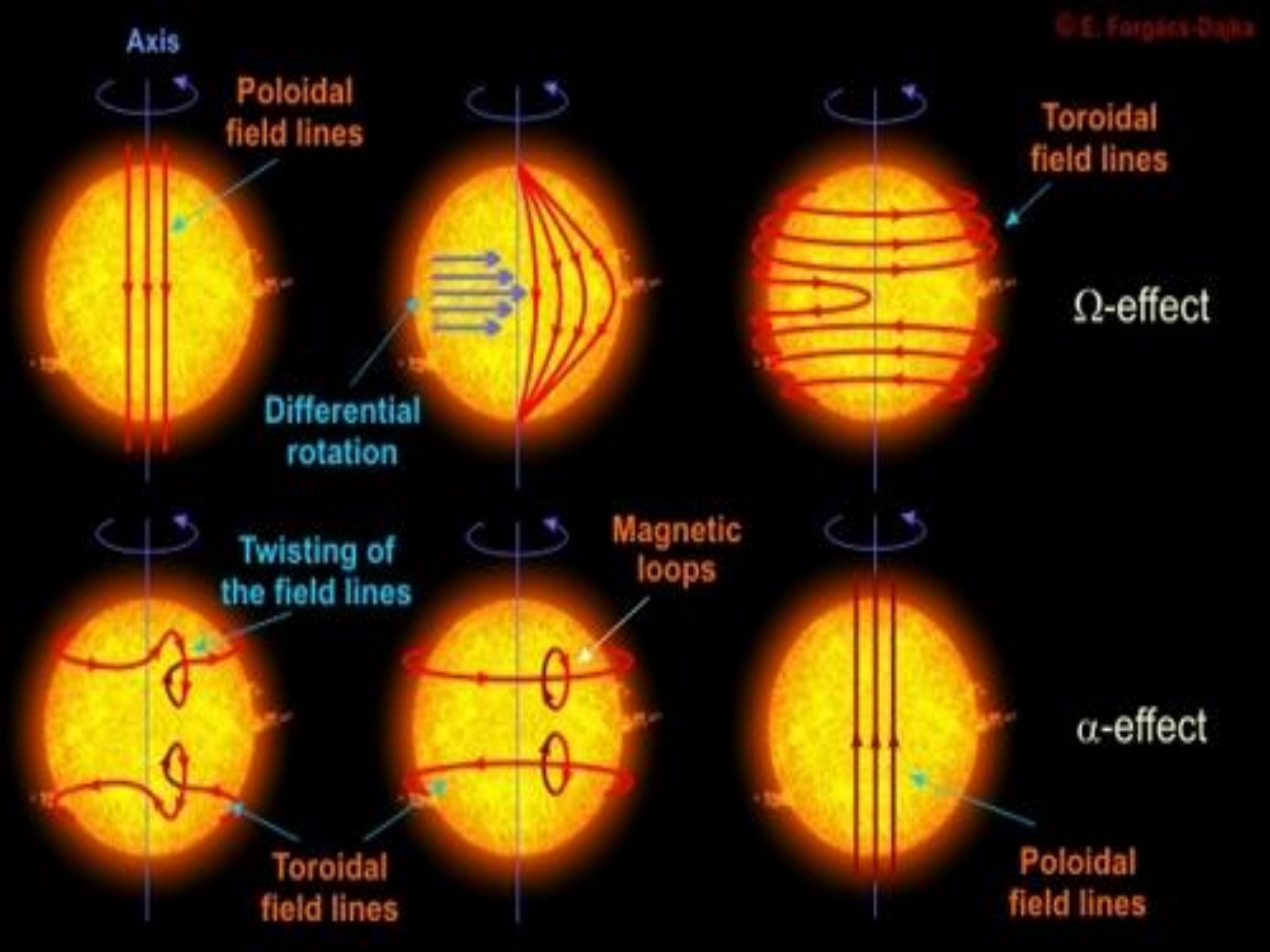
ДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ В ОДНОСЛОЙНОЙ И ДВУХСЛОЙНОЙ СРЕДАХ

Е.П. Попова[1], К.А. Потемина[2], Н.А. Юхина[1]

1 - МГУ, Физический факультет, Москва, Россия
2 - МГУ, Мех.-мат., Москва, Россия


© E. Forgács-Dajka
Axis
Poloidal field lines
Differential rotation
Toroidal field lines
Ω-effect
Twisting of the field lines
Magnetic loops
Toroidal field lines
α-effect
Poloidal field lines

$$\frac{\partial A}{\partial t} = R_\alpha \alpha B + \frac{\partial^2 A}{\partial \theta^2},$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = R_\omega \sin\theta \frac{\partial A}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 B}{\partial \theta^2}.$$

$\alpha = \alpha_0(\theta)/(1+\xi^2 B^2) \approx \alpha_0(\theta)(1-\xi^2 B^2)$, где $\alpha_0(\theta)$ - значение спиральности в незамагниченной среде, а $B_0 = \xi^{-1}$ - магнитное поле, при котором происходит существенное подавление альфа-эффекта. Для определенности считаем, что $\alpha_0(\theta) = \cos\theta$.

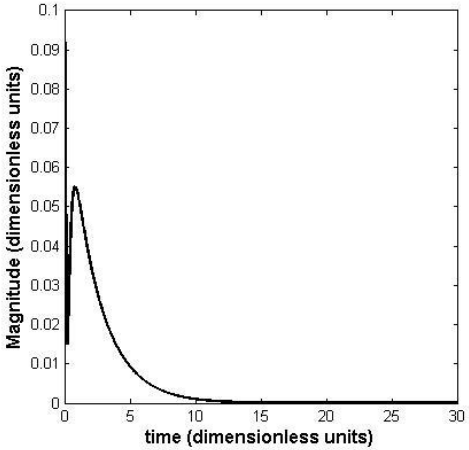
Векторный потенциал и тороидальная компонента магнитного поля

Дипольная симметрия

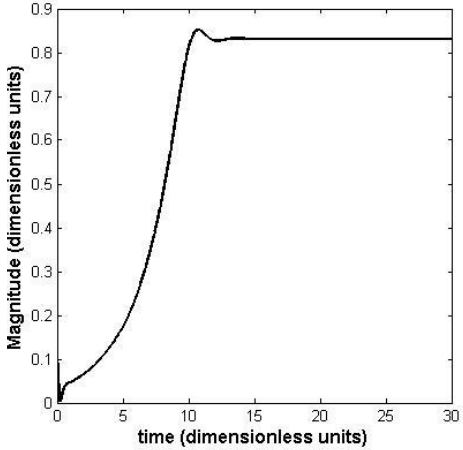
$$B(\theta, t) = b_1(t) \sin 2\theta + b_2(t) \sin 4\theta$$

$$A(\theta, t) = a_1(t) \sin \theta + a_2(t) \sin 3\theta$$

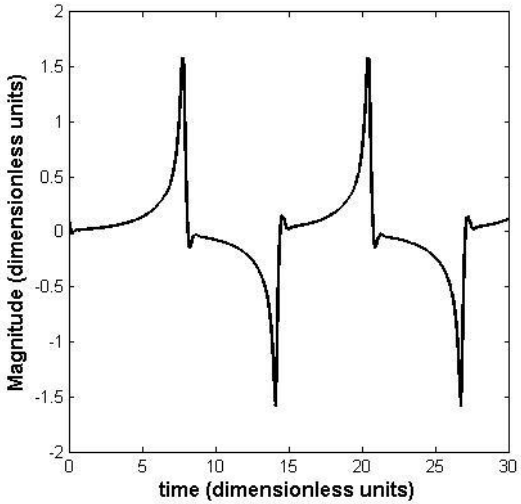
Старшая мода (b_1) тороидальной компоненты магнитного поля



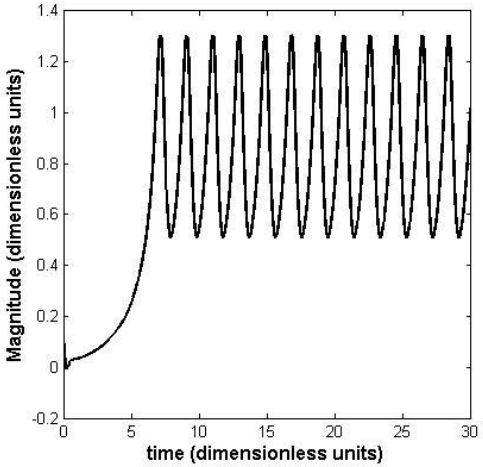
Затухание



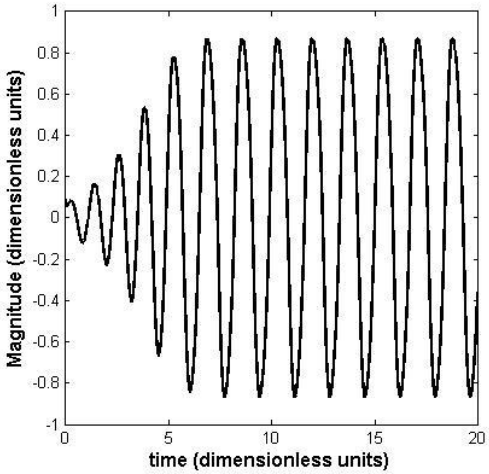
Рост с выходом на стационарный режим



Всплески



Васцилляции



Осцилляции

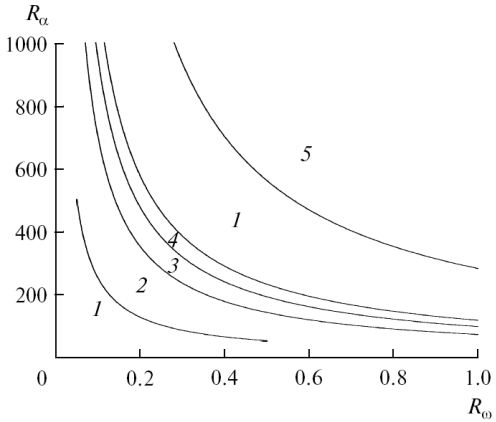


Рис. 2. Параметрическое пространство маломодовой модели в координатах R_α, R_ω с указанием областей, соответствующих различным режимам: затухание (*1*), стационарное решение (*2*), васцилляции (*3*), динамо-всплески (*4*) и осцилляции (*5*).

Дипольная симметрия, 4 компоненты, С.Н. Нефедов, Д.Д. Соколов, АЖ, 87,№3, с. 278, 2010

Векторный потенциал и тороидальная компонента магнитного поля

Дипольная симметрия

$$B(\theta, t) = b_1(t)\sin 2\theta + b_2(t)\sin 4\theta + b_3(t)\sin 6\theta,$$

$$A(\theta, t) = a_1(t)\sin \theta + a_2(t)\sin 3\theta + a_3(t)\sin 5\theta.$$

Динамическая система

$$\dot{a}_1 = -a_1 + R_\alpha b_1/2 - 3/4 R_\alpha \xi^2 b_1 b_3^2 - 3/8 R_\alpha \xi^2 b_1^3 + 3/8 R_\alpha \xi^2 b_1^2 b_3 - 3/4 R_\alpha \xi^2 b_1 b_2^2 -$$

$$-3/8 R_\alpha \xi^2 b_2^2 b_3,$$

$$\dot{a}_2 = 1/2 R_\alpha b_1 + 1/2 R_\alpha b_2 - 9a_2 - 3/4 R_\alpha \xi^2 b_1^2 b_2 - 3/8 R_\alpha \xi^2 b_2^2 b_3 - 3/4 R_\alpha \xi^2 b_2 b_3^2 -$$

$$-3/8 R_\alpha \xi^2 b_1^3 - 3/4 R_\alpha \xi^2 b_1 b_2 b_3 - 3/8 R_\alpha \xi^2 b_2^3 + 3/8 R_\alpha \xi^2 b_1^2 b_3 - 3/4 R_\alpha \xi^2 b_1 b_2^2 -$$

$$-3/4 R_\alpha \xi^2 b_1 b_3^2,$$

$$\dot{a}_3 = 1/2 R_\alpha b_3 + 1/2 R_\alpha b_2 - 25a_3 - 3/8 R_\alpha \xi^2 b_1 b_2^2 - 3/4 R_\alpha \xi^2 b_1^2 b_2 -$$

$$-3/4 R_\alpha \xi^2 b_1 b_2 b_3 + 1/8 R_\alpha \xi^2 b_1^3 - 3/4 R_\alpha \xi^2 b_1^2 b_3 - 3/8 R_\alpha \xi^2 b_2^3 - 3/8 R_\alpha \xi^2 b_3^3 -$$

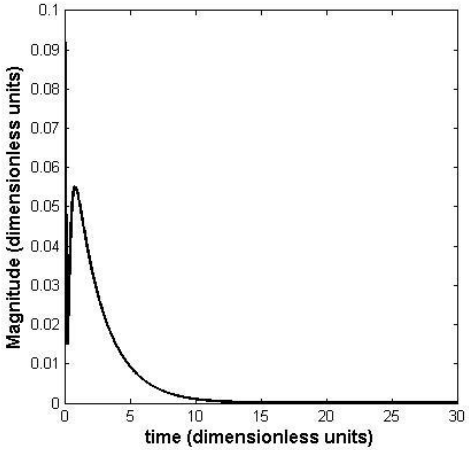
$$-3/4 R_\alpha \xi^2 b_2^2 b_3 - 3/4 R_\alpha \xi^2 b_2 b_3^2,$$

$$\dot{b}_1 = R_\omega a_1/2 - 3R_\omega a_2/2 - 4b_1, \dot{b}_2 = 3R_\omega a_2/2 - 16b_2 - 5/2 R_\omega a_3,$$

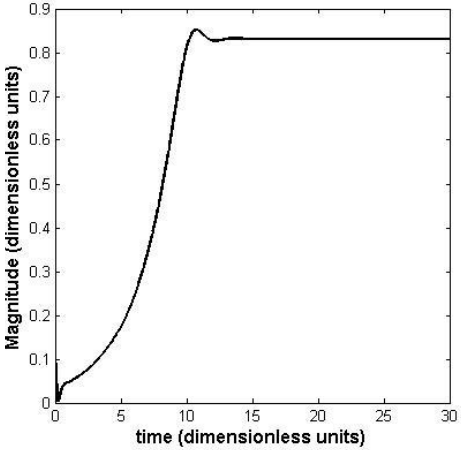
$$\dot{b}_3 = 5R_\omega a_3/2 - 36b_3.$$

Дипольная симметрия

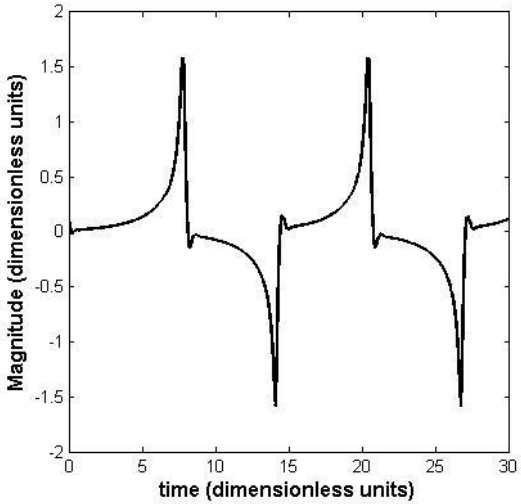
Старшая мода (b_1) тороидальной компоненты магнитного поля



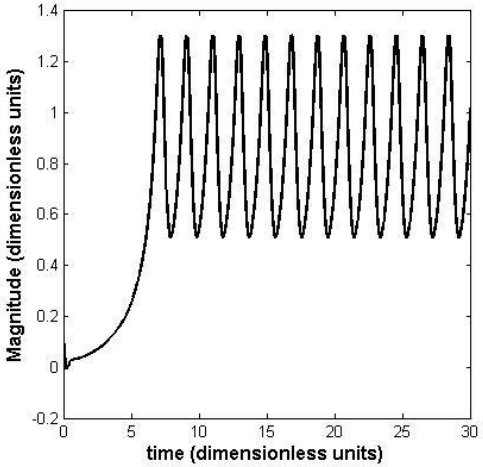
Затухание



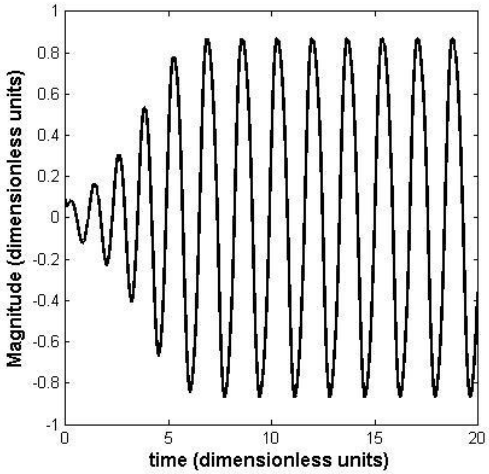
Рост с выходом на стационарный режим



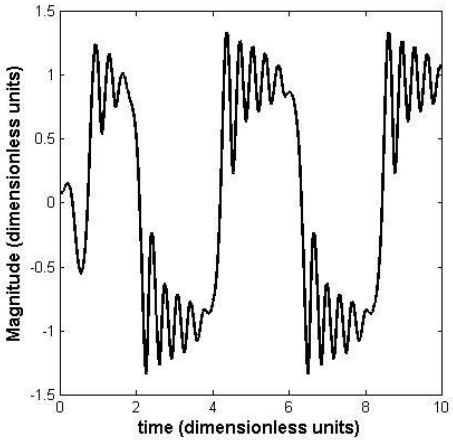
Всплески



Васцилляции

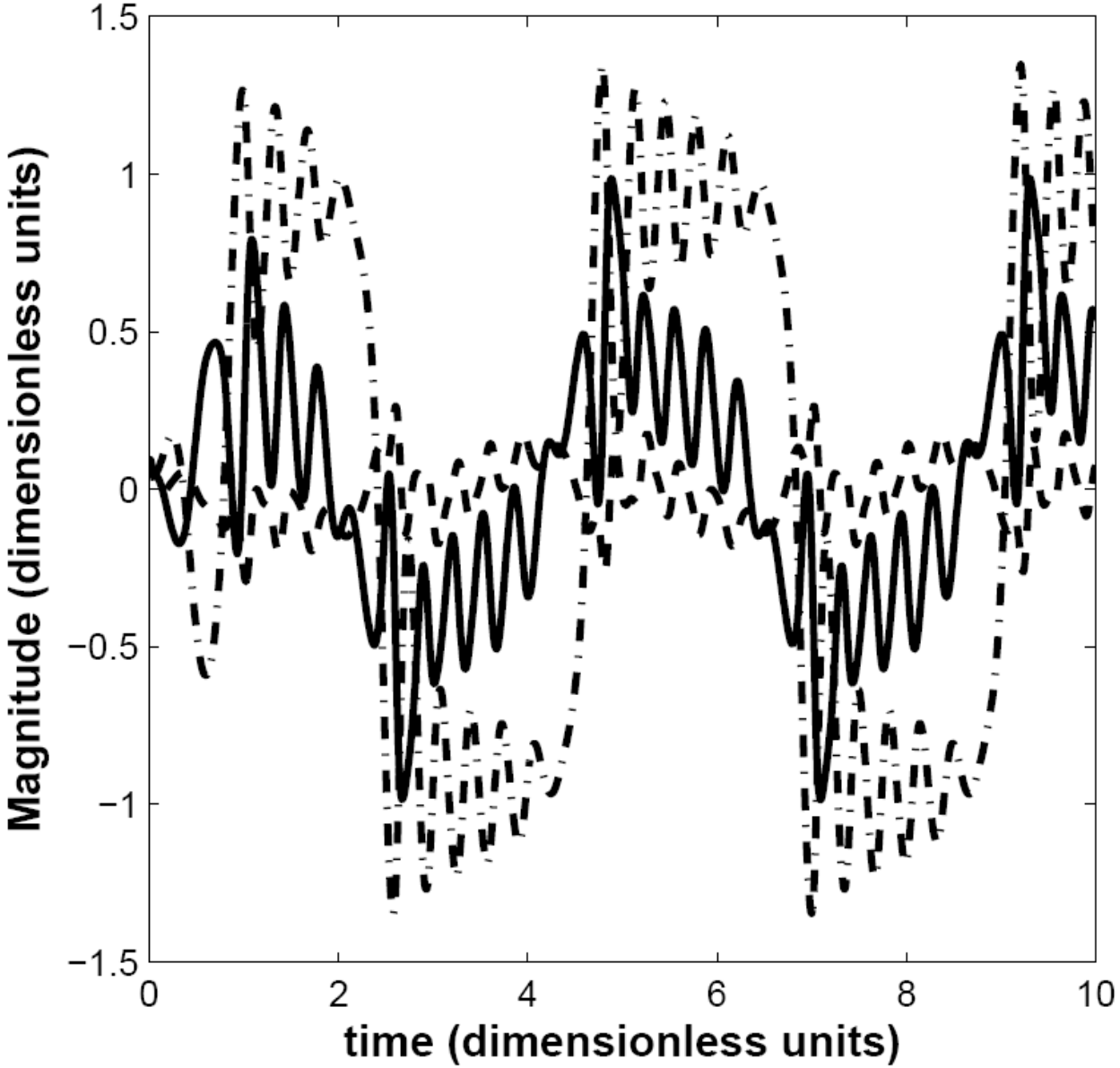


Осцилляции



Смешанные осцилляции

3 моды тороидальной компоненты магнитного поля

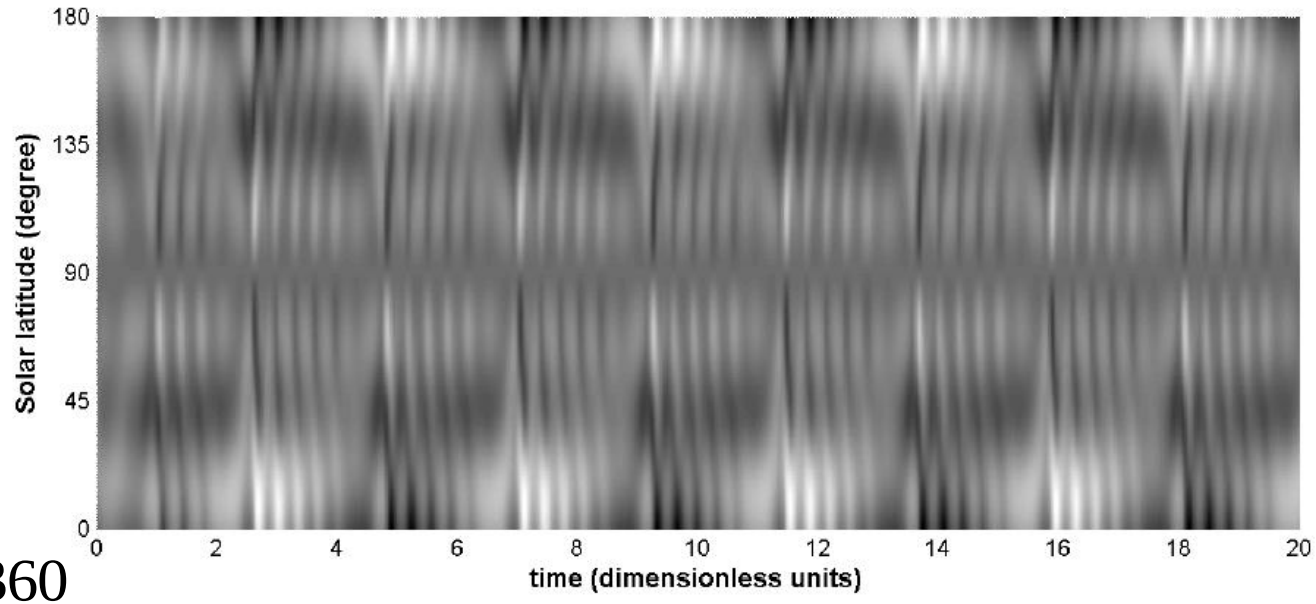


Дипольная симметрия (6 мод)

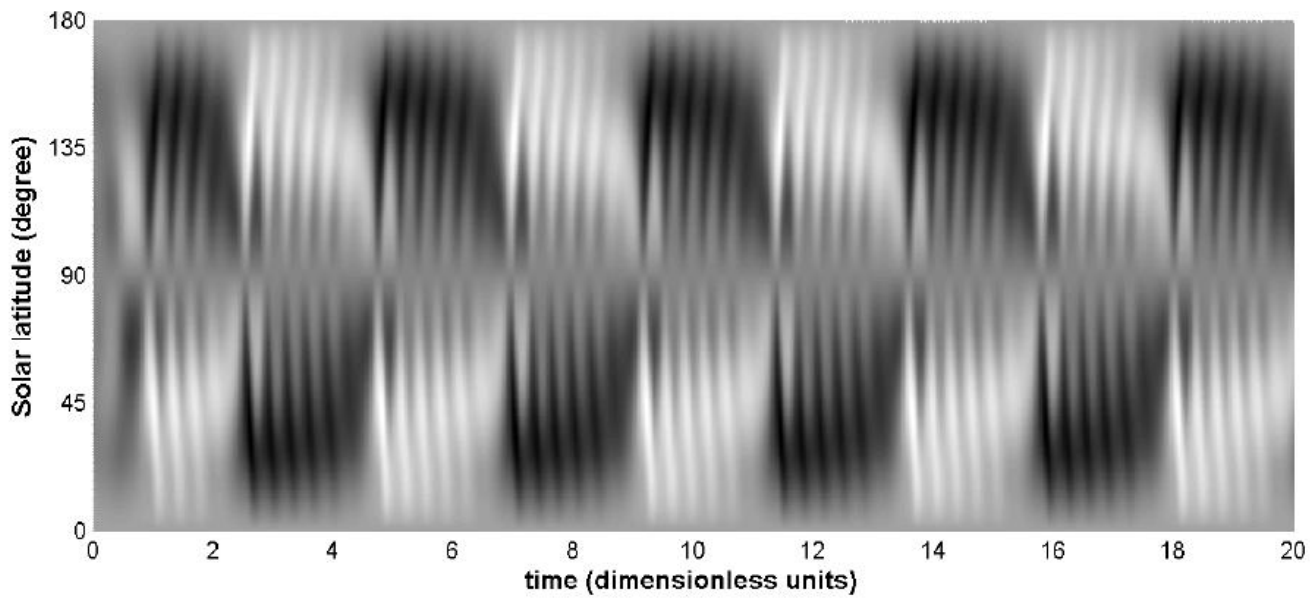
0>D>-110 затухание
-110>D> -210 осцилляции
Дальнейшее увеличение по модулю D ведет к появлению коротких циклов на фоне длинных.
-210>D> -450 смешанные осцилляции
-450>D> -550 васцилляции
Далее решение разрушается

0<D<20 затухание
20<D<90 растущее решение с выходом на стационарный режим
90<D<100 васцилляции
100<D<170 всплески
170<D<180 всплески с хаосом
Далее решение разрушается

Баттерфляй-диаграммы для полоидального и тороидального полей в случае дипольной симметрии магнитного поля



$$R_\alpha R_\omega = -360$$



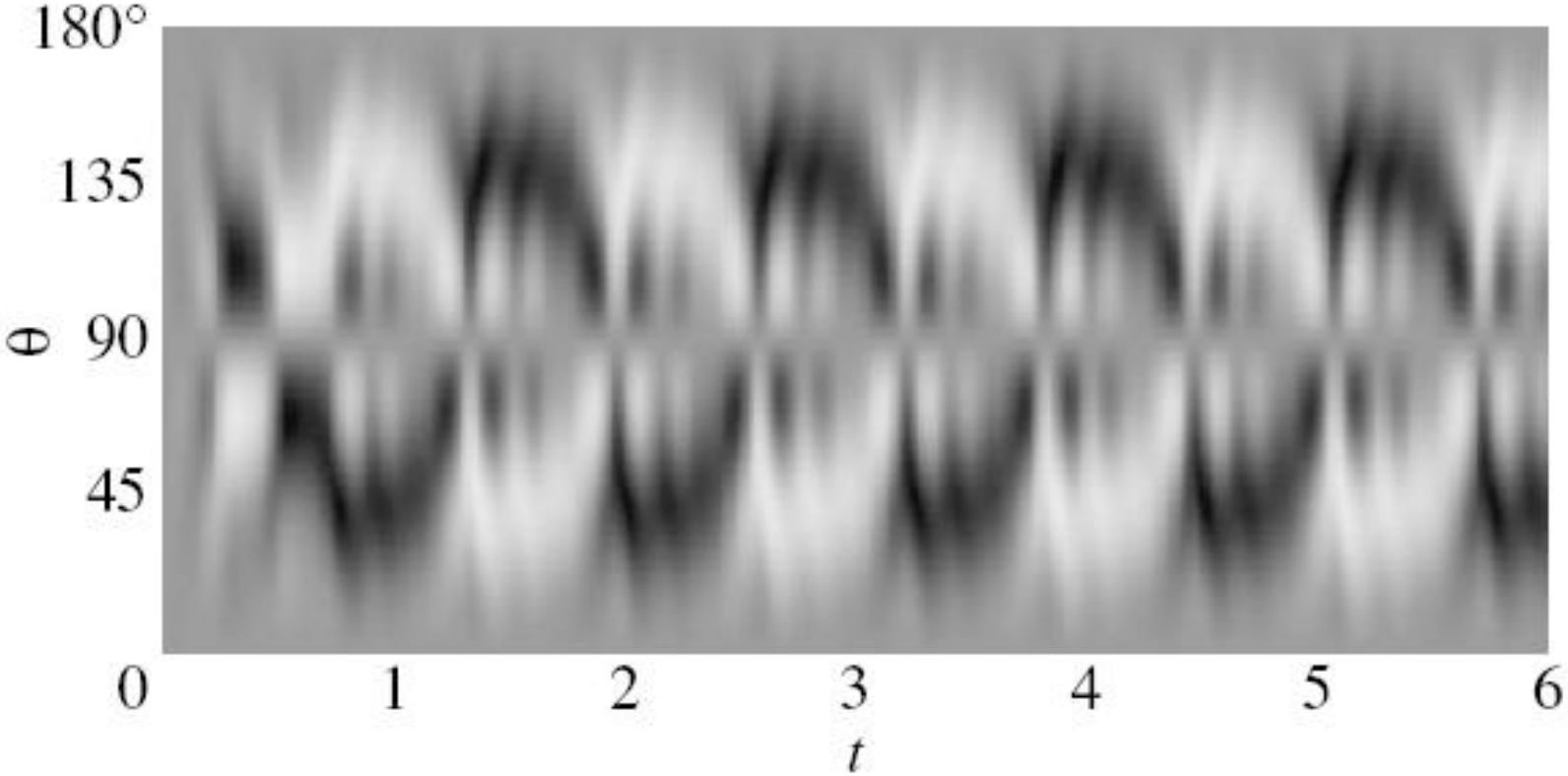
Уравнения динамо

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{\alpha_0 B}{1+\xi^2 B^2} + \beta \frac{\partial^2 A}{\partial \theta^2} - V \frac{\partial A}{\partial \theta} - \eta^2 \beta A,$$

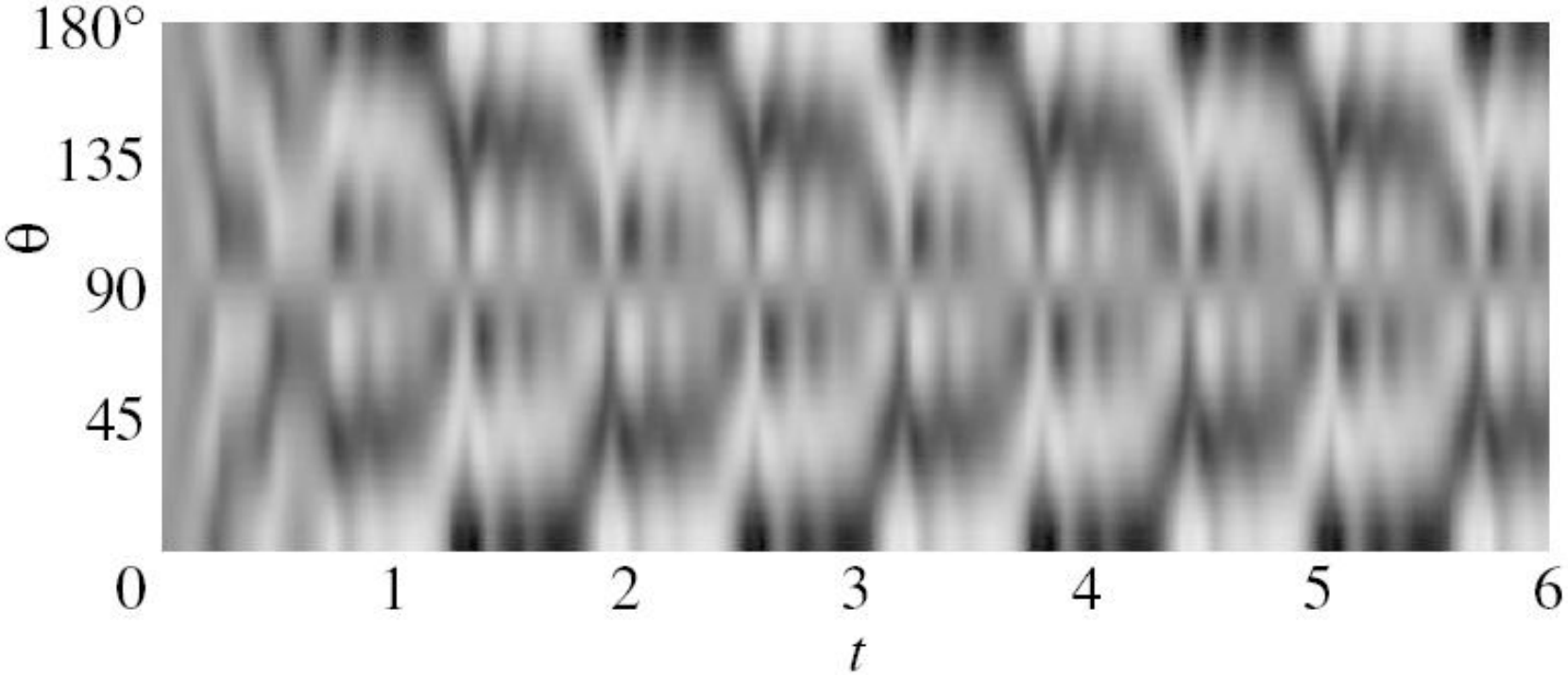
$$\frac{\partial B}{\partial t} = -D \cos\theta \frac{\partial A}{\partial \theta} + \beta \frac{\partial^2 B}{\partial \theta^2} - \frac{\partial (VB)}{\partial \theta} - \eta^2 \beta B.$$

$\alpha = \alpha_0(\theta)/(1+\xi^2 B^2) \approx \alpha_0(\theta)(1-\xi^2 B^2)$, где $\alpha_0(\theta)$ - значение спиральности в незамагниченной среде, а $B_0 = \xi^{-1}$ - магнитное поле, при котором происходит существенное подавление альфа-эффекта. Для определенности считаем, что $\alpha_0(\theta) = \cos\theta$.

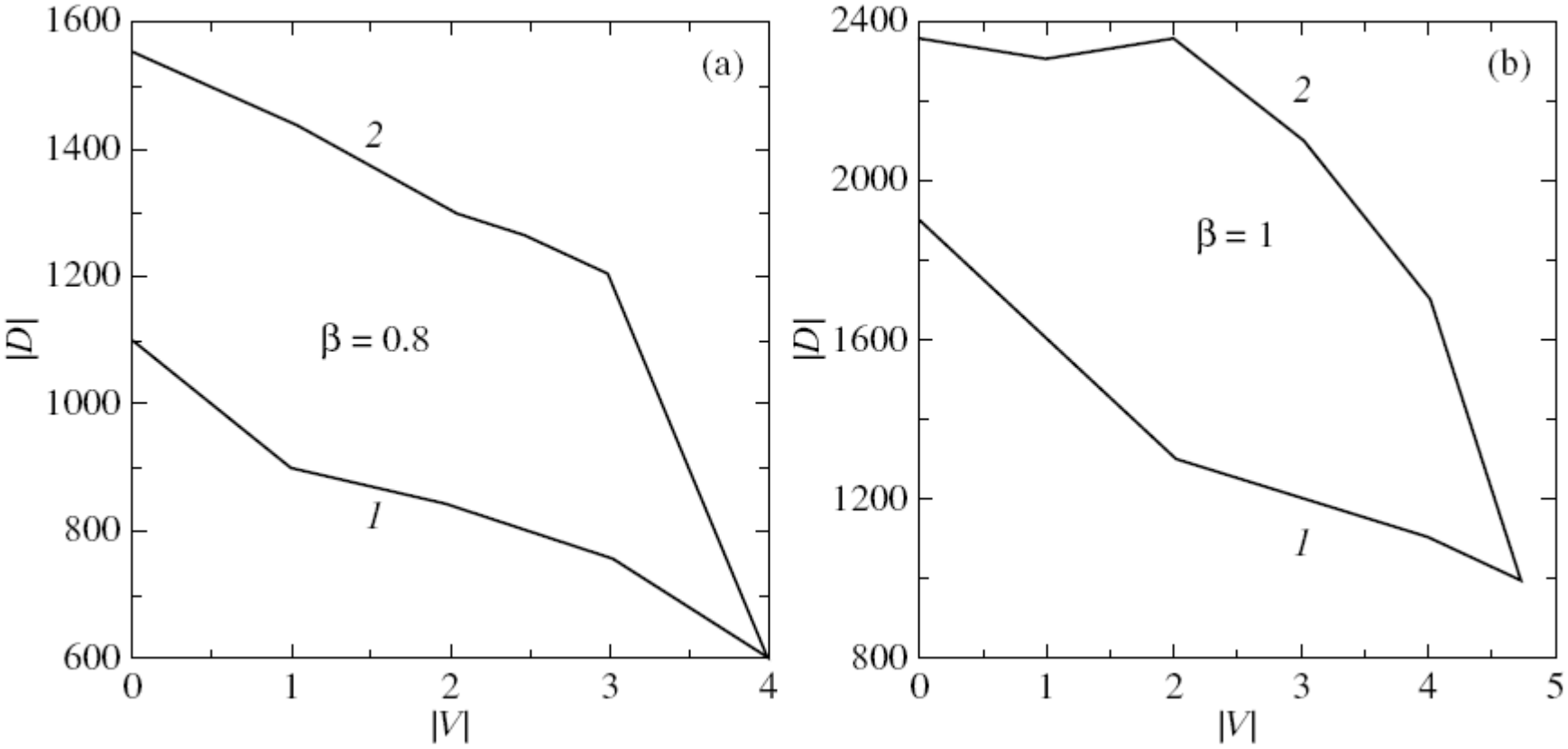
Модельная баттерфляй-диаграмма для тороидального поля при $D = -2100$, $V = -1$, $\beta = 1$, $\eta = 3$.



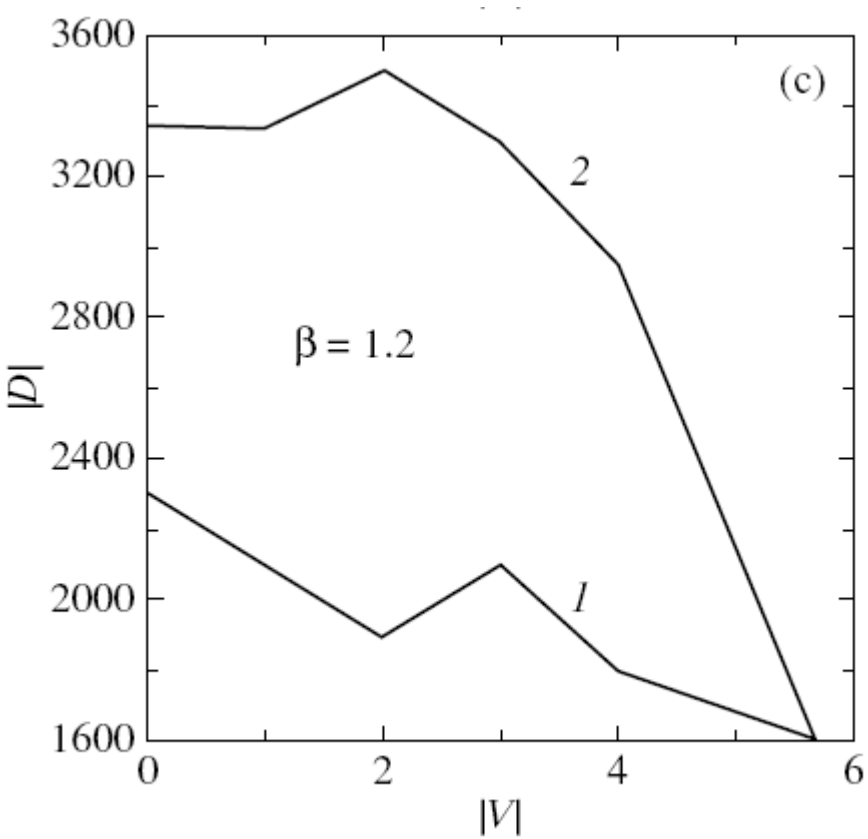
Модельная баттерфляй-диаграмма для полоидального поля при $D = -2100$, $V = -1$, $\beta = 1$, $\eta = 3$,



Область значений меридиональных потоков и динамо-чисел, когда воспроизводится смешанный цикл для толщины конвективной зоны равной солнечной.

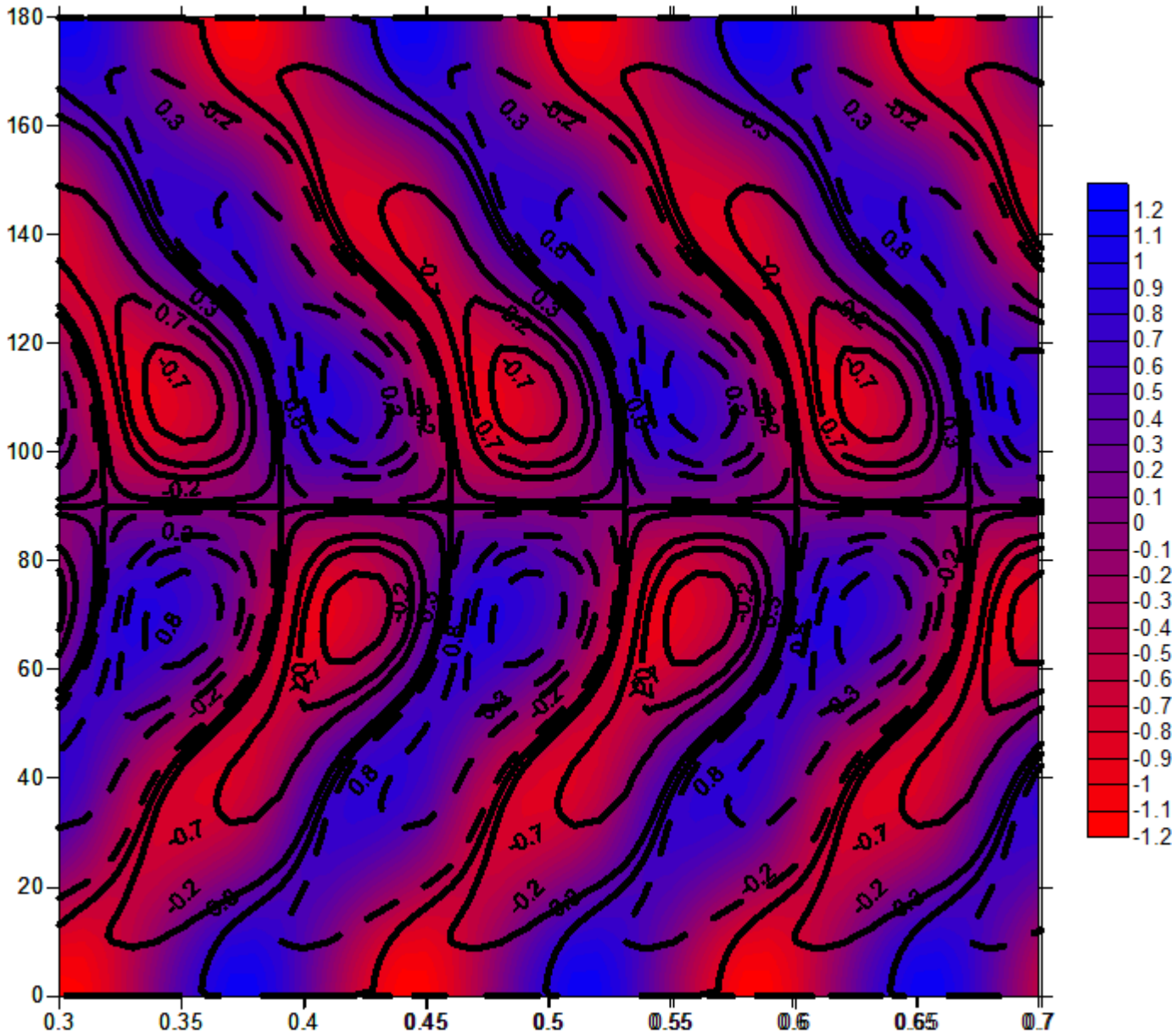


Нижняя граница каждой области соответствует соотношению периодов примерно 1 к 3, а верхняя - соотношению периодов примерно 1 к 22.

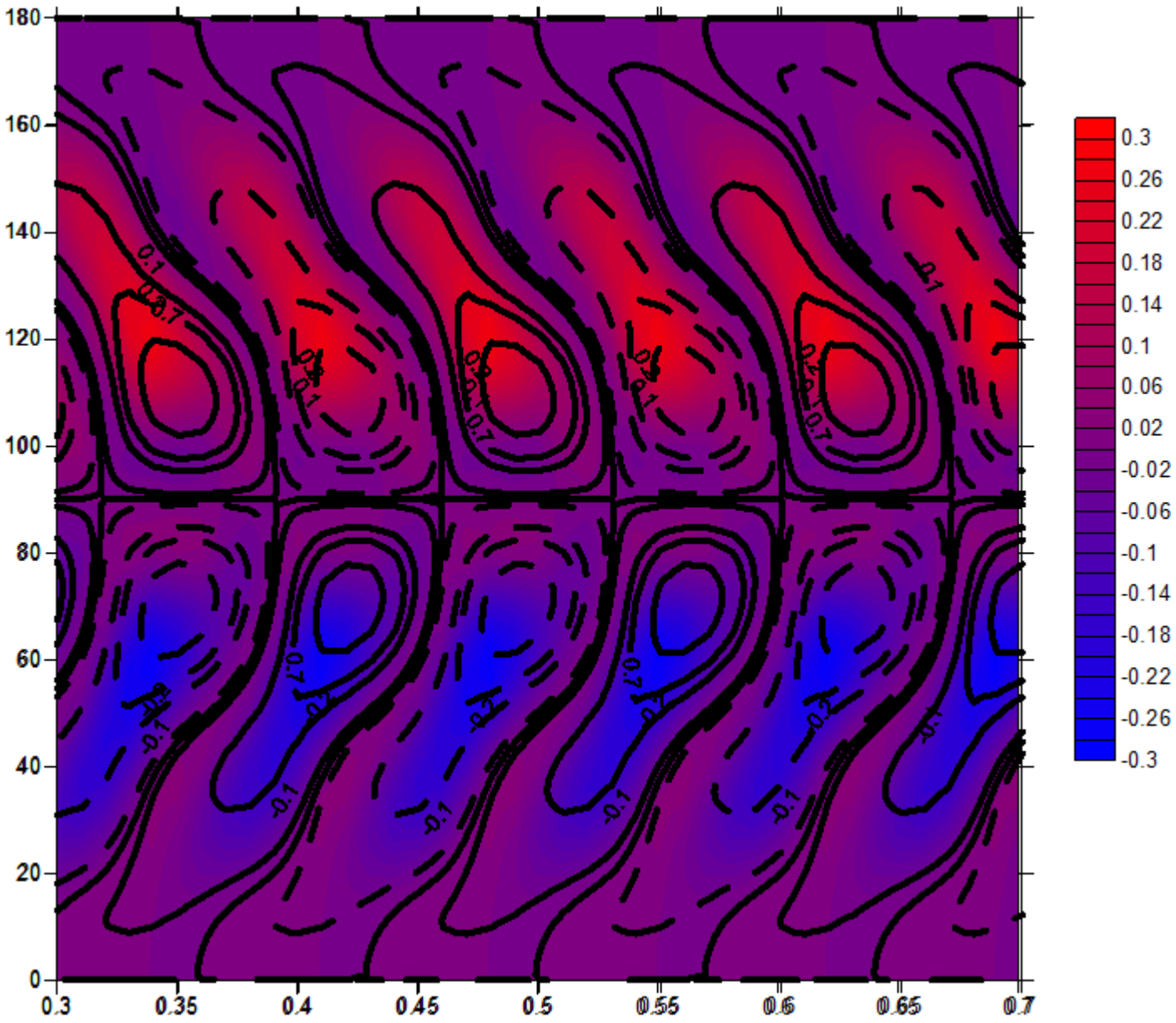


При достижении меридиональной циркуляцией некоторого критического значения воспроизведение режима смешанных осцилляций становится невозможным для фиксированного значения β. При увеличении β и динамо-числа критическое значение меридиональной циркуляции увеличиваются.

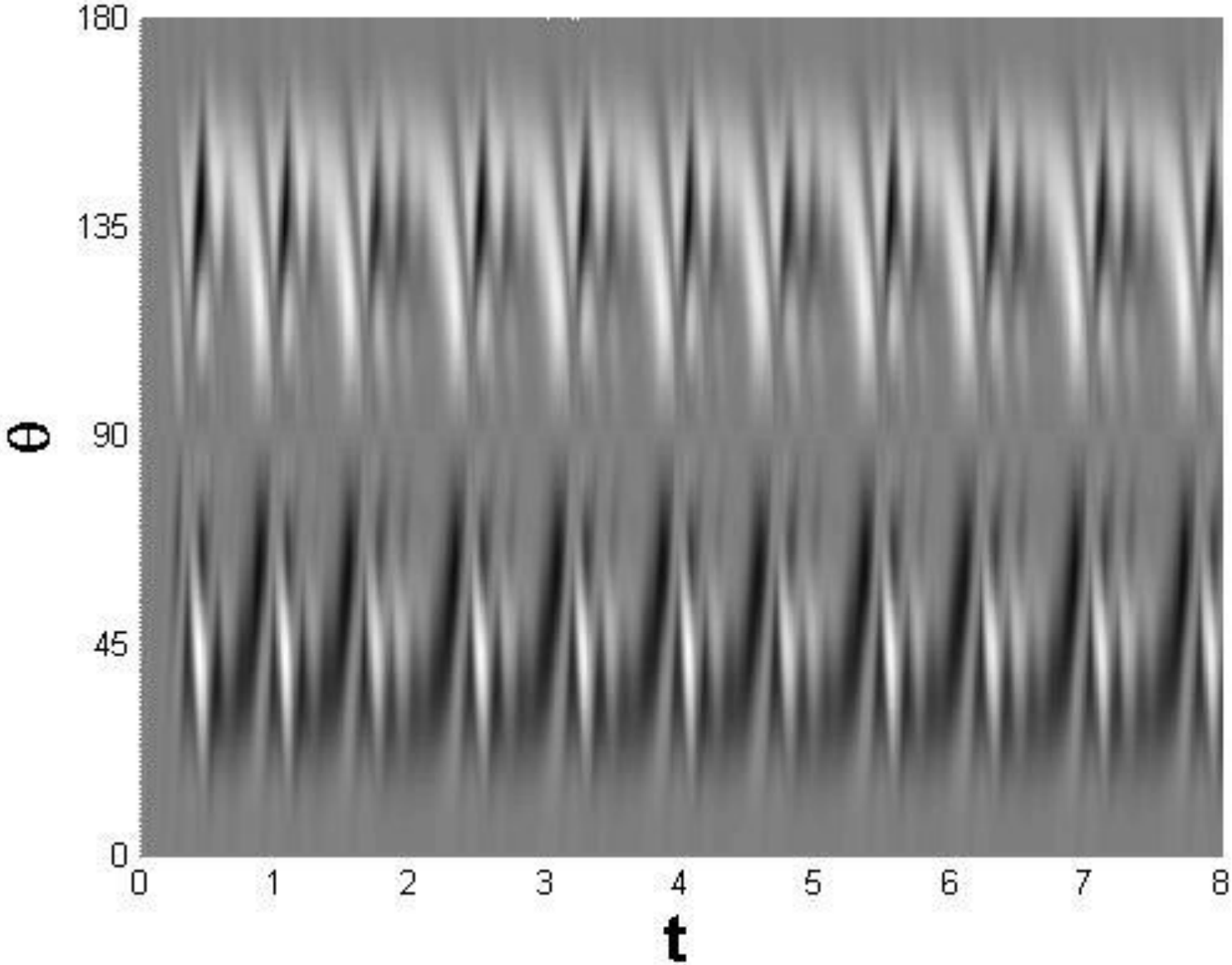
Тороидальное и полоидальное поля



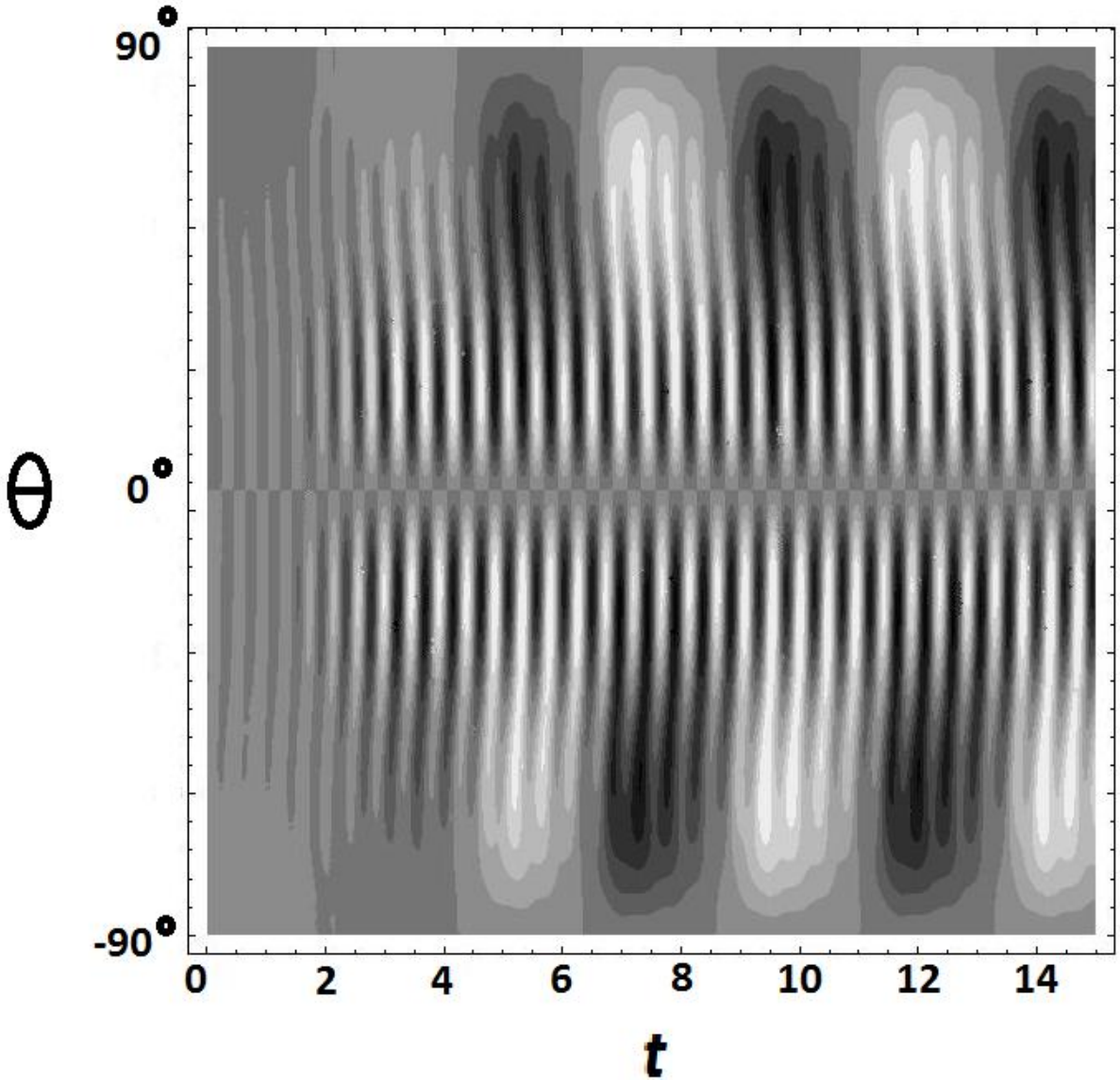
Тороидальное поле и спиральность



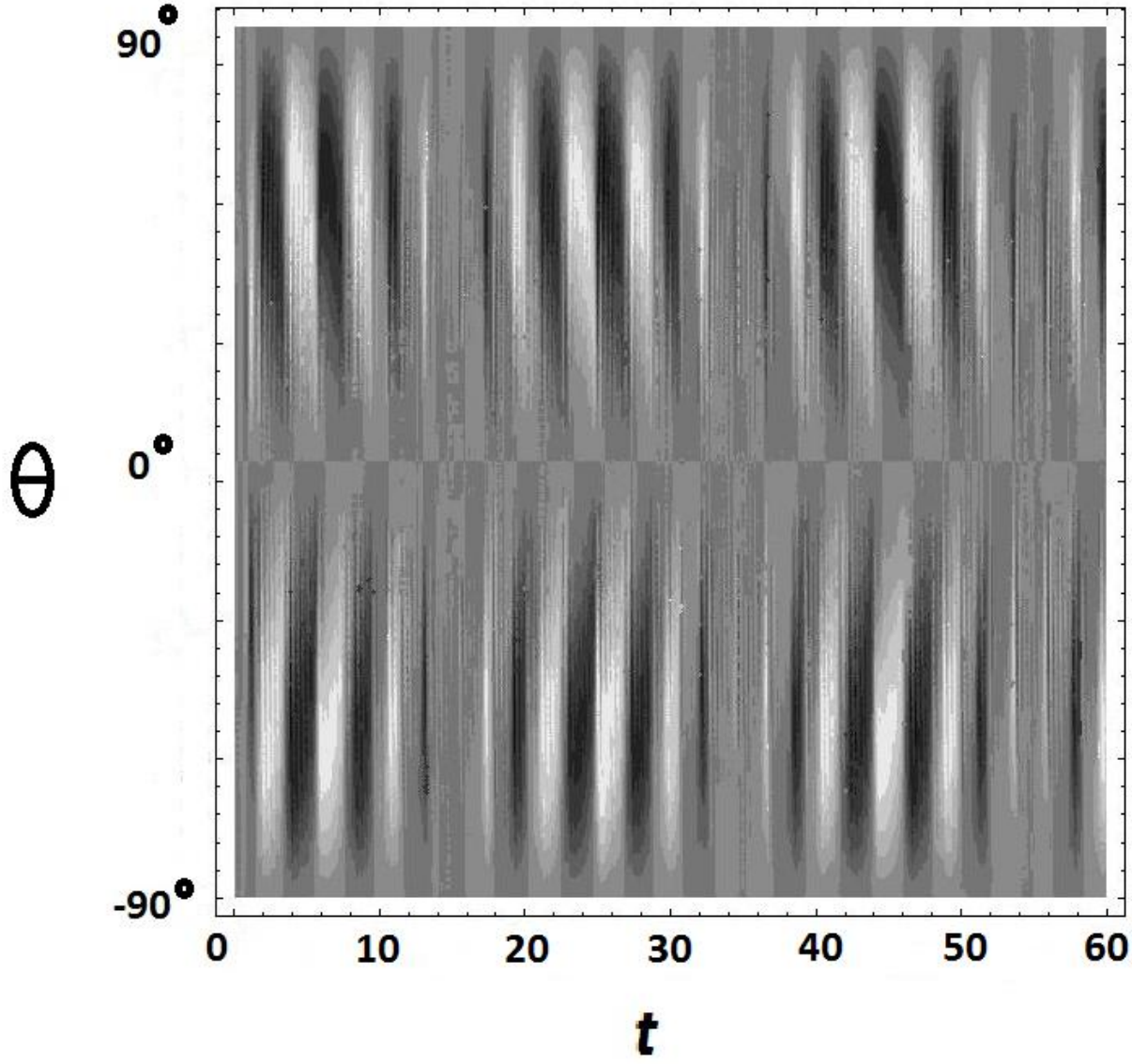
Спиральность



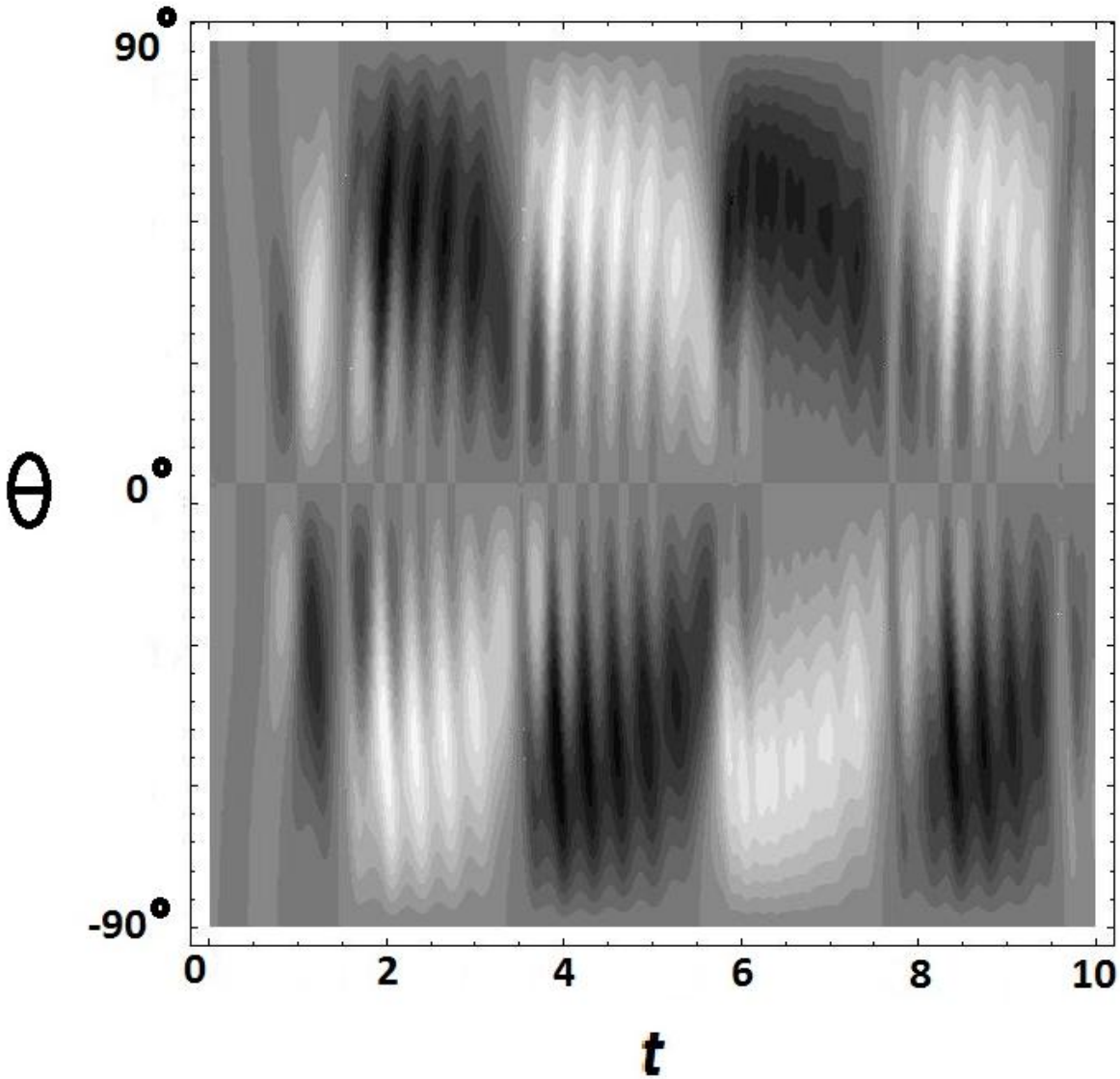
Баттерфляй-диаграмма для тороидального поля при D=-140, v=-5 в верхнем и при D=-400, v=3 в нижнем слоях, η=0



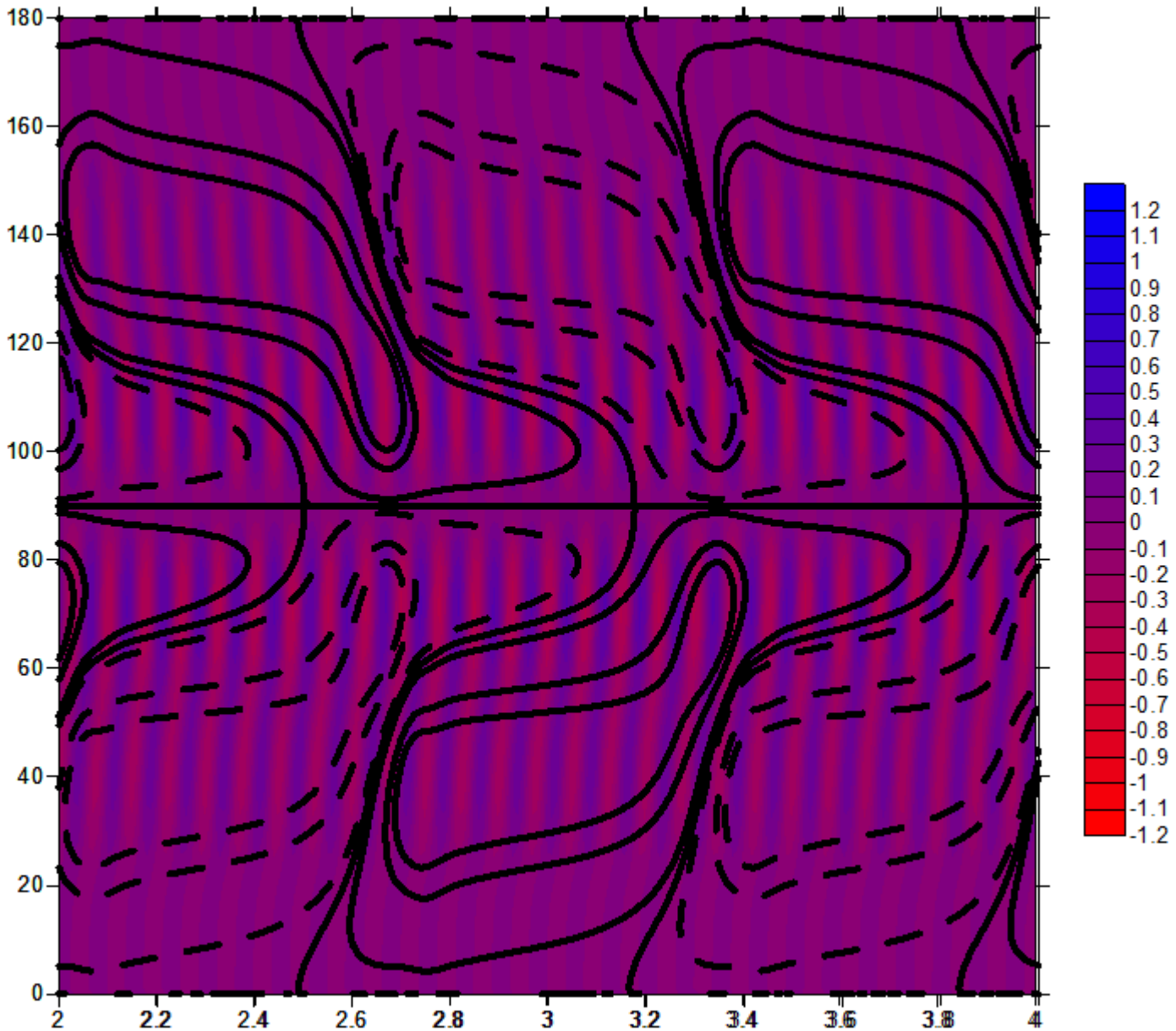
Баттерфляй-диаграмма для тороидального поля при D=-350, v=-0.2 в верхнем и при D=-350, v=0.2 в нижнем слоях, η=0



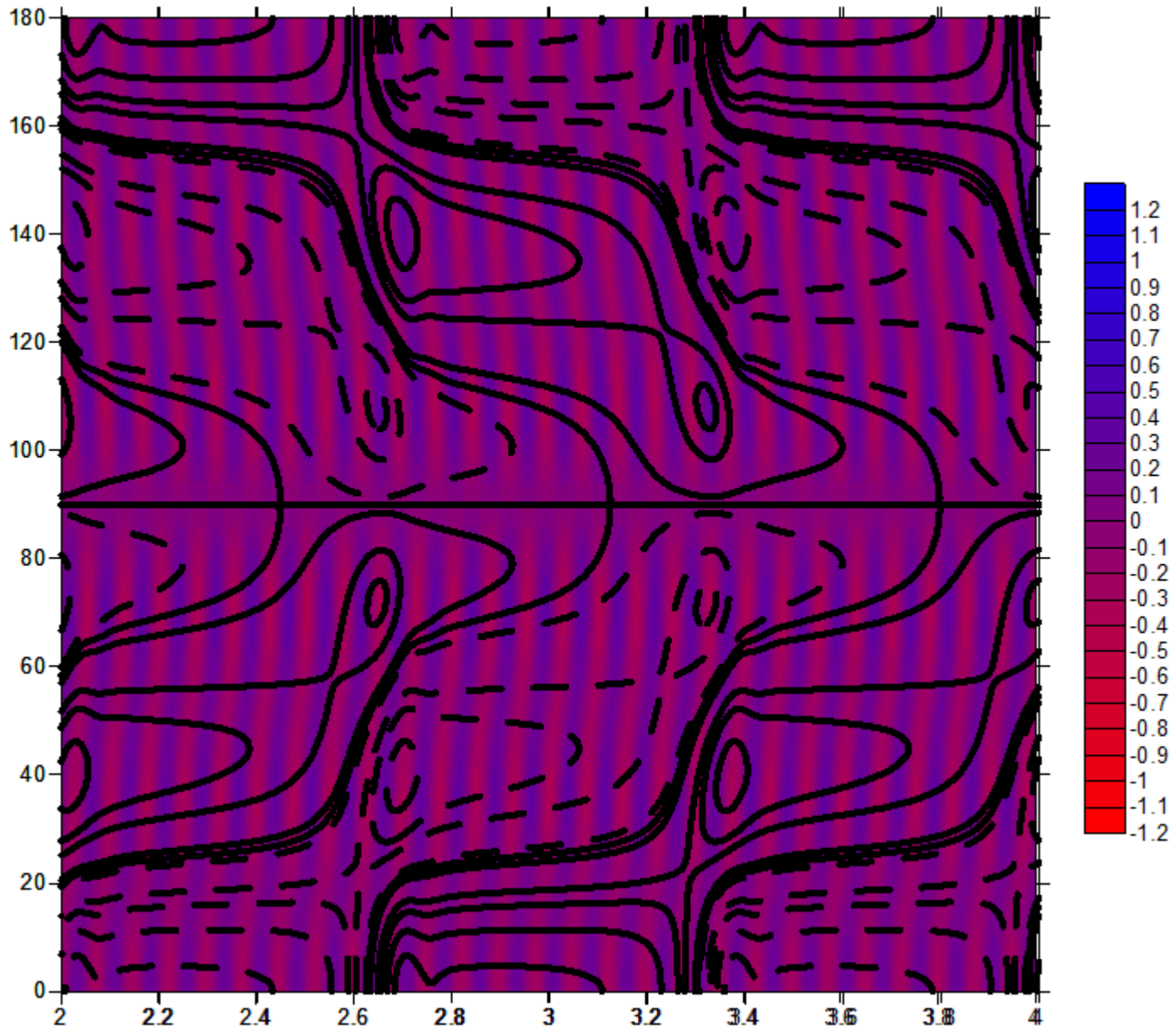
Увеличенный участок предыдущей диаграммы (при D=-350, v=-0.2 в верхнем и при D=-350, v=0.2 в нижнем слоях , η=0)



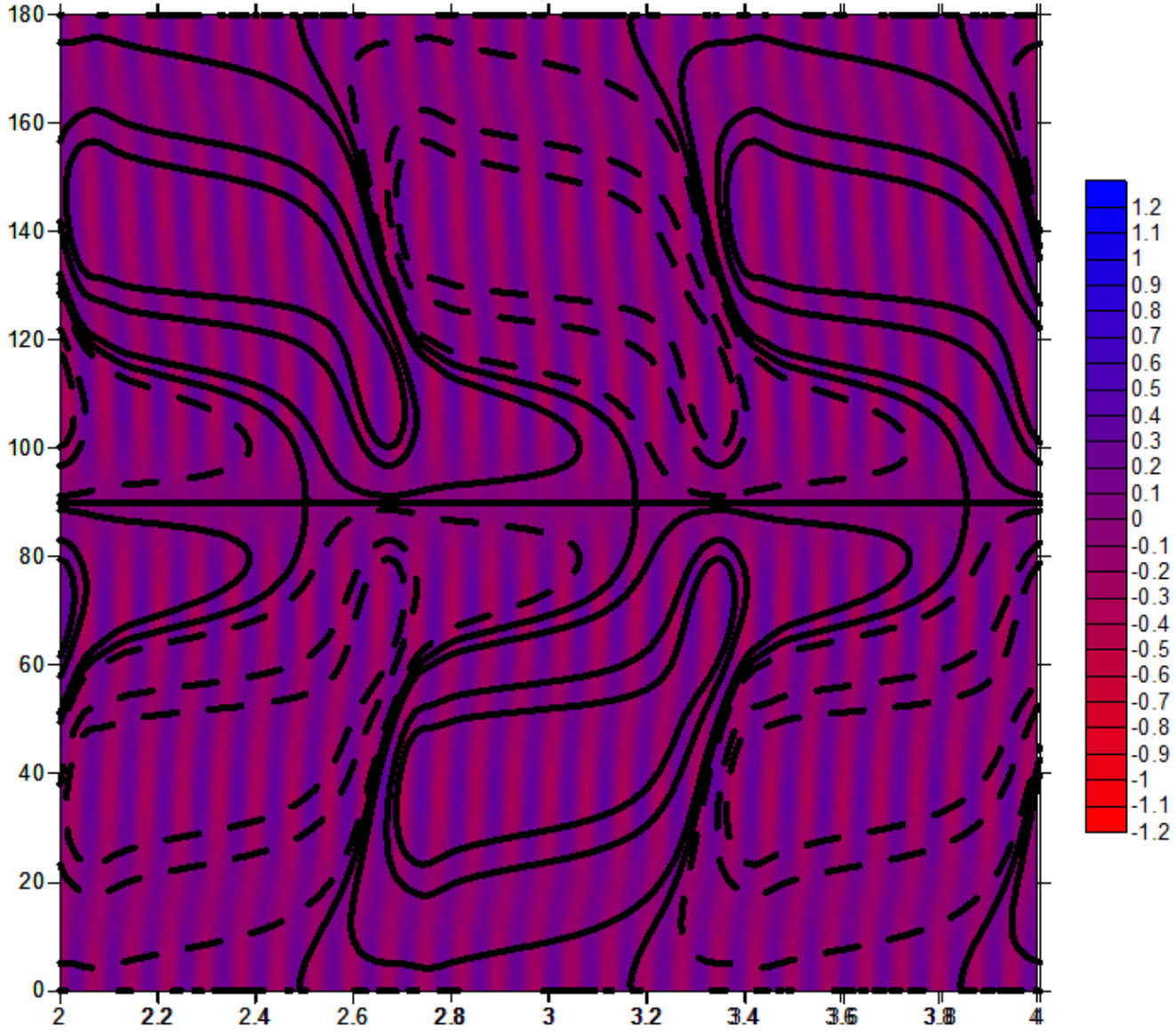
D=-6500, V=11sin(2θ) (во внутреннем слое), V=-11sin(2θ) (во внешнем)
Тороидальные поля



D=-6500, V=11sin(2θ) (во внутреннем слое), V=-11sin(2θ) (во внешнем)
Полоидальные поля

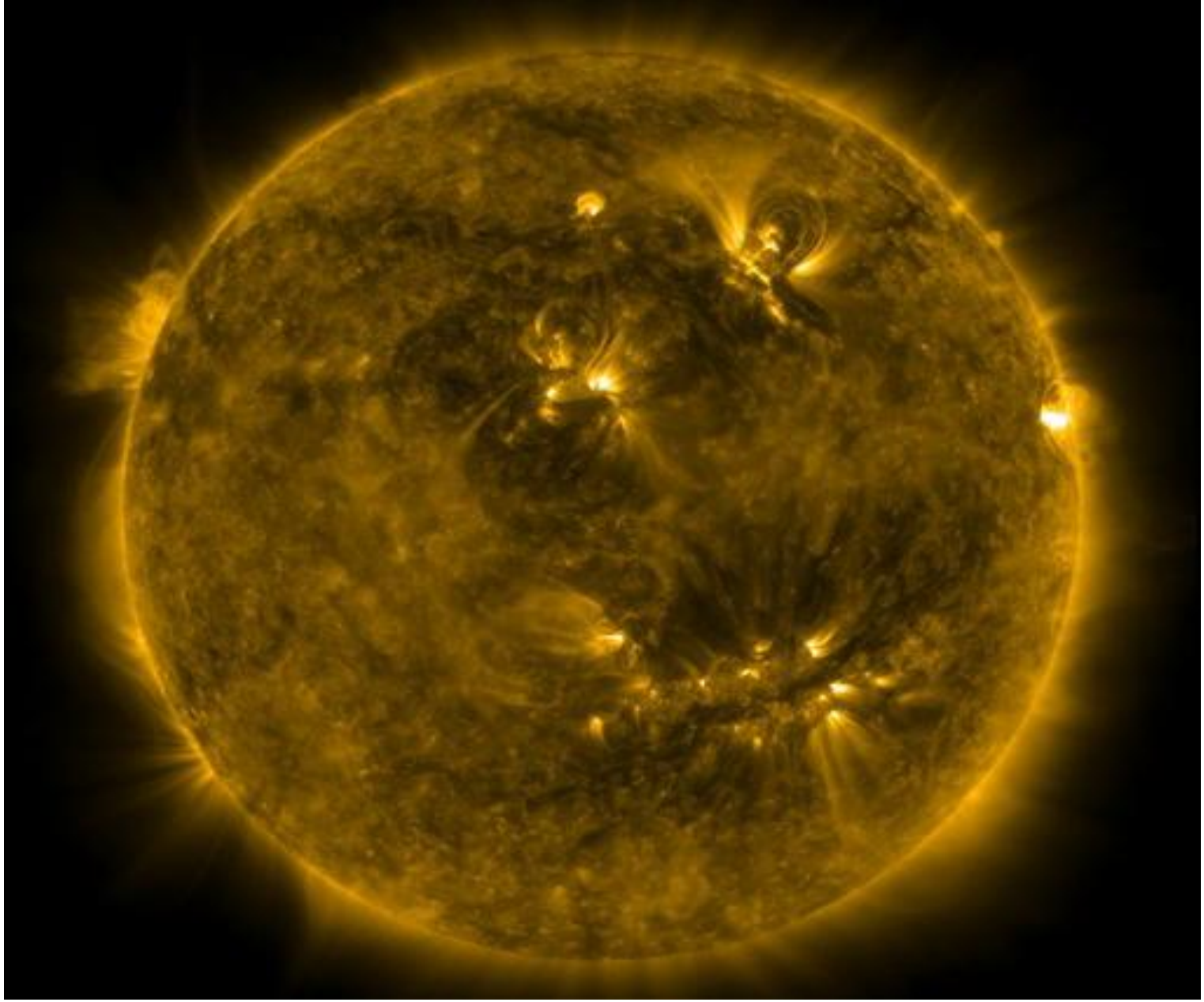


D=-6500, V=11sin(2θ) (во внутреннем слое), V=-11sin(2θ) (во внешнем).
Тороидальное и полоидальное поля



Выводы

- Источники динамо могут находиться на разной глубине конвективной зоны и действовать с разной интенсивностью. На основе такой схемы построена динамическая система в случае звездного динамо в двухслойной среде с учетом меридиональных потоков для моделирования двойного цикла, который соответствует одновременному присутствию 22-летних и квазидвухлетних осцилляций магнитного поля.
- Показано, что режим смешанных осцилляций может возникать за счет того, что в верхнем слое конвективной зоны движение динамо-волны противоположно меридиональным потокам. Это ведет к торможению распространения тороидального поля и генерации медленных осцилляций. В более глубоких слоях направления распространения динамо-волны и меридиональных потоков совпадают, в результате чего возникают быстрые осцилляции магнитного поля. За счет этого суммарный вклад двух осцилляций с разными частотами соответствует появлению квазидвухлетних циклов на фоне 22-летних.
- В случае, если меридиональные потоки менее интенсивные, то может реализовываться тройной цикл за счет режимов с двумя гармониками в каждом слое и биений.



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

$$\alpha^m \sim \chi^m = \langle \mathbf{B}\mathrm{rot}\mathbf{B} \rangle = \langle \mathbf{B}\mathbf{A} \rangle$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \mathrm{rot}(\alpha \mathbf{B}) + \mathrm{rot}[\mathbf{U} \times \mathbf{B}] + \beta \triangle \mathbf{B},$$

$$\mathbf{B} = B_\phi(r, \theta, t)\mathbf{e}_\phi + \nabla \times (A(r, \theta, t)\mathbf{e}_\phi)$$

$$\mathbf{U} = u_r(r, \theta, t)\mathbf{e}_r + u_\theta(r, \theta, t)\mathbf{e}_\theta + \Omega(r, \theta) r \sin(\theta)\mathbf{e}_\phi$$