

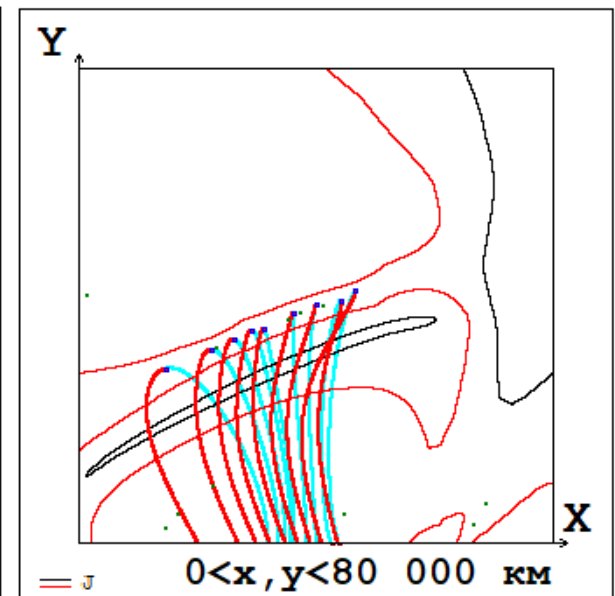
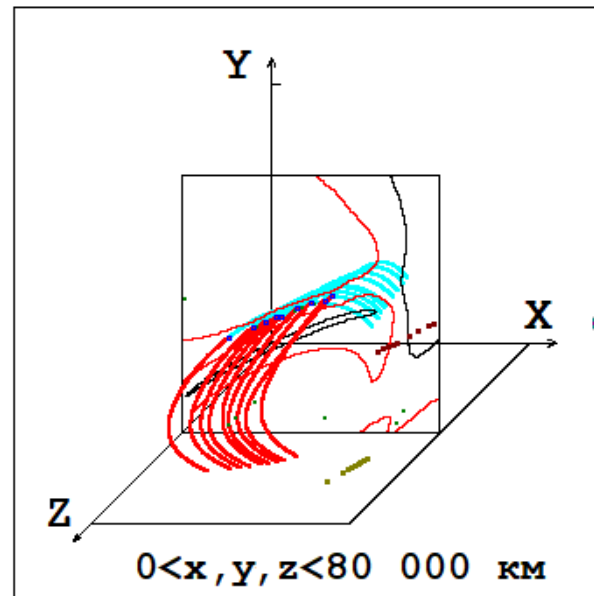
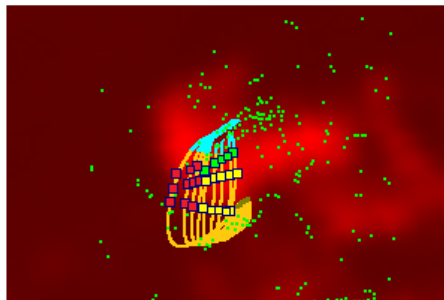
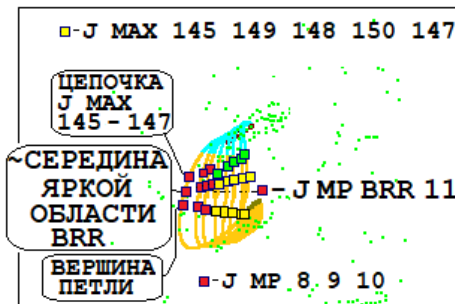
МГД МОДЕЛИРОВАНИЕ С ЦЕЛЬЮ ИЗУЧЕНИЯ ГЕНЕРАЦИИ СКЛ: ПРОТЯЖЕННАЯ ПОВЕРХНОСТЬ, ПРОХОДЯЩАЯ ЧЕРЕЗ ЦЕПОЧКУ МАКСИМУМОВ ПЛОТНОСТИ ТОКА

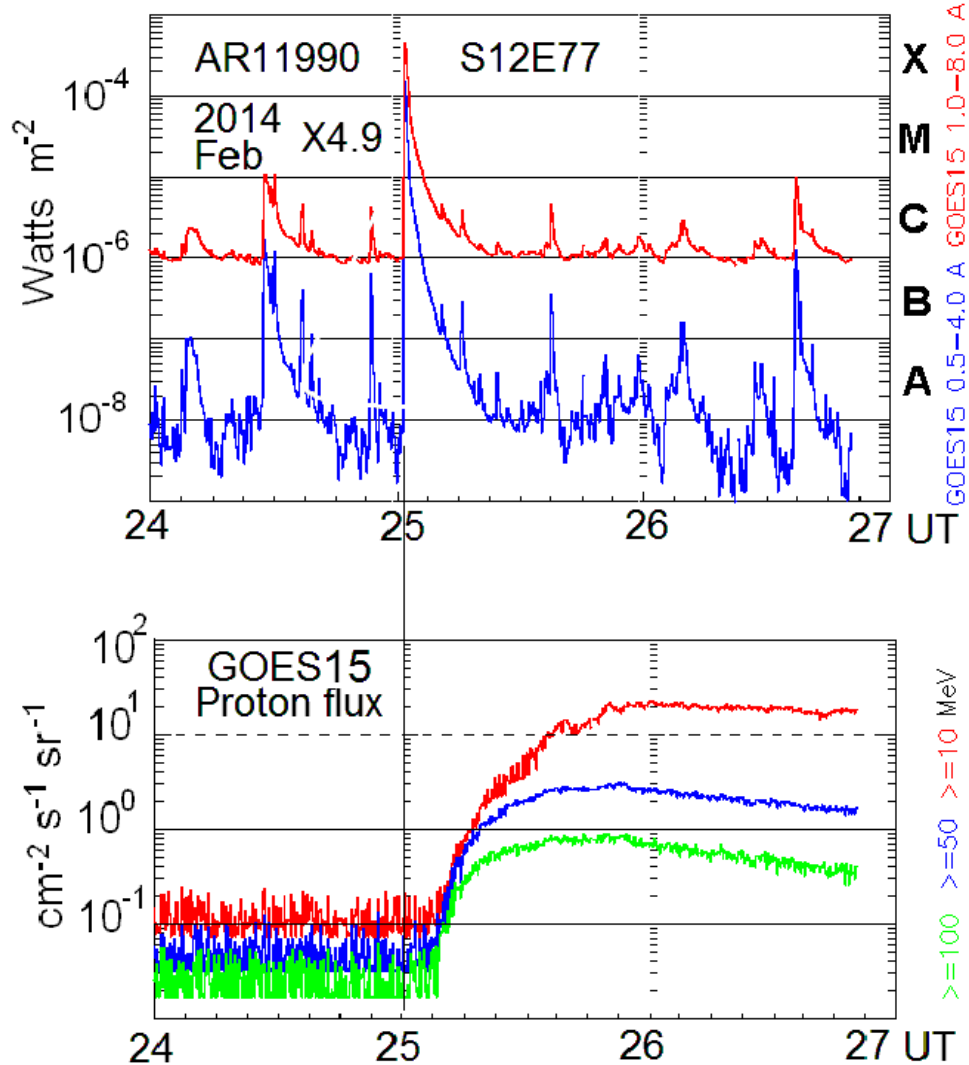
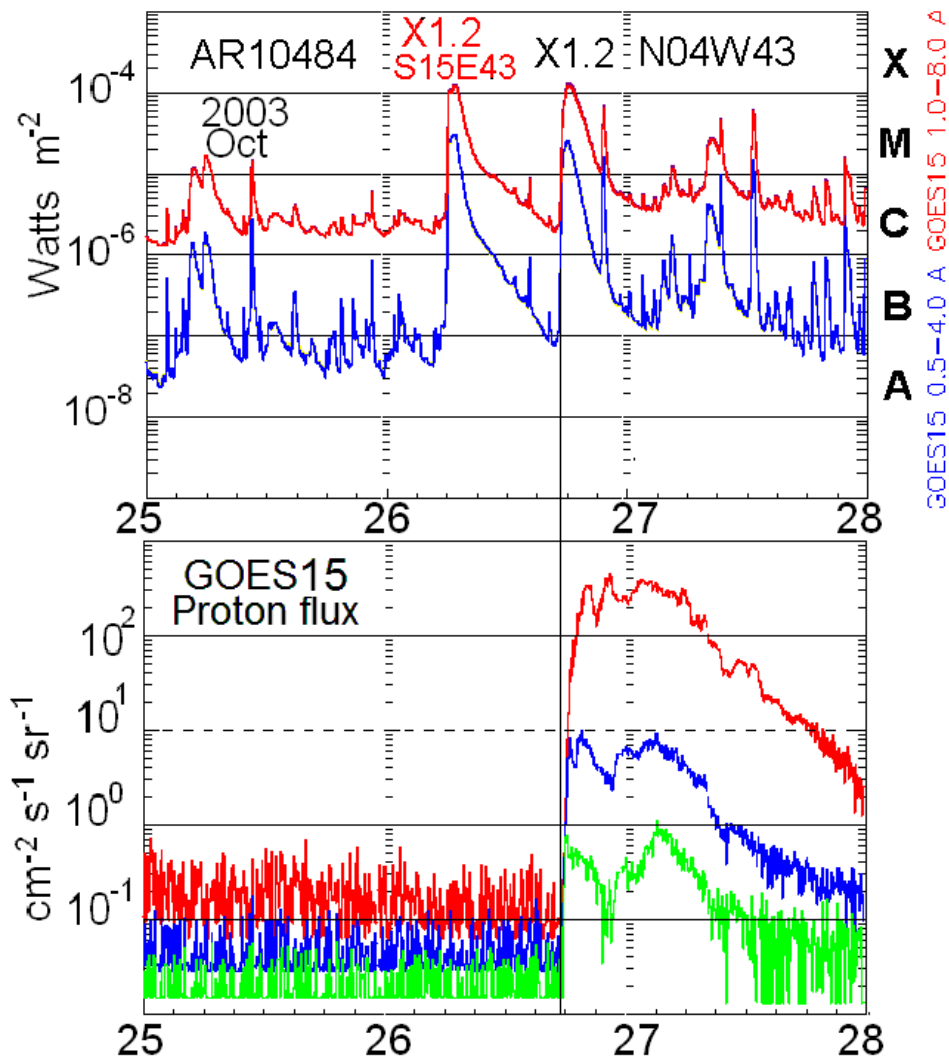
А.И. Подгорный (ФИАН), И.М. Подгорный (ИНАСАН)

podgorny@lebedev.ru

Для изучения механизма солнечной вспышки, необходимо начинать расчет за несколько суток перед вспышкой, когда в короне еще не накоплена магнитная энергия для солнечной вспышки.

Лучше нет на свете книжки, чем про солнечные вспышки!





Солнечные космические лучи — потоки ускоренных заряженных частиц, прежде всего протонов с энергией до 20 ГэВ сопровождают некоторые солнечные вспышки.

Фотосфера
300 км
 $n = 10^{17} \text{ см}^{-3}$
 $T = 6000^\circ \text{ К}$

Хромосфера
3 000 км
 $n = 10^{12} \text{ см}^{-3}$
 $T = 10\ 000^\circ \text{ К}$

Корона
~ несколько $R_{\text{Солнца}}$
 $n = 10^8 \text{ см}^{-3}$
 $T = 1\ 000\ 000^\circ \text{ К}$

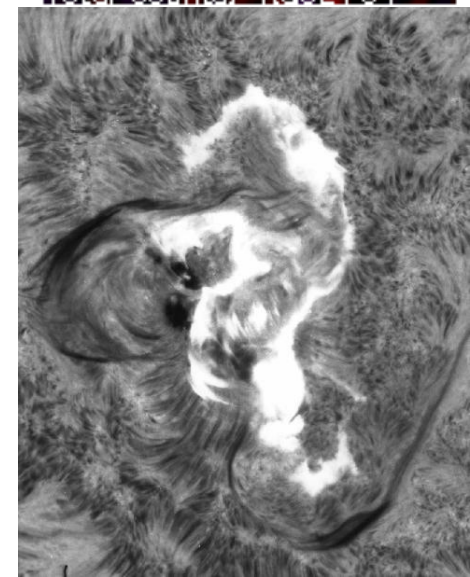
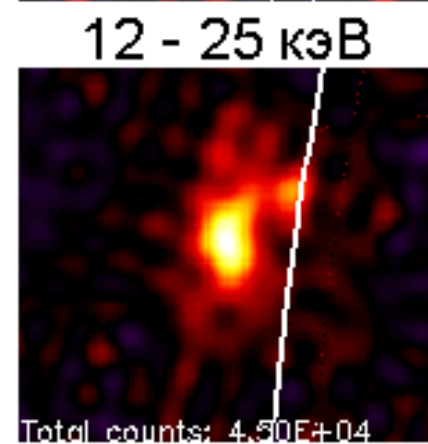
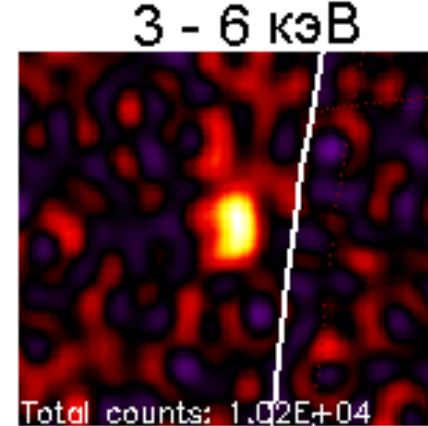
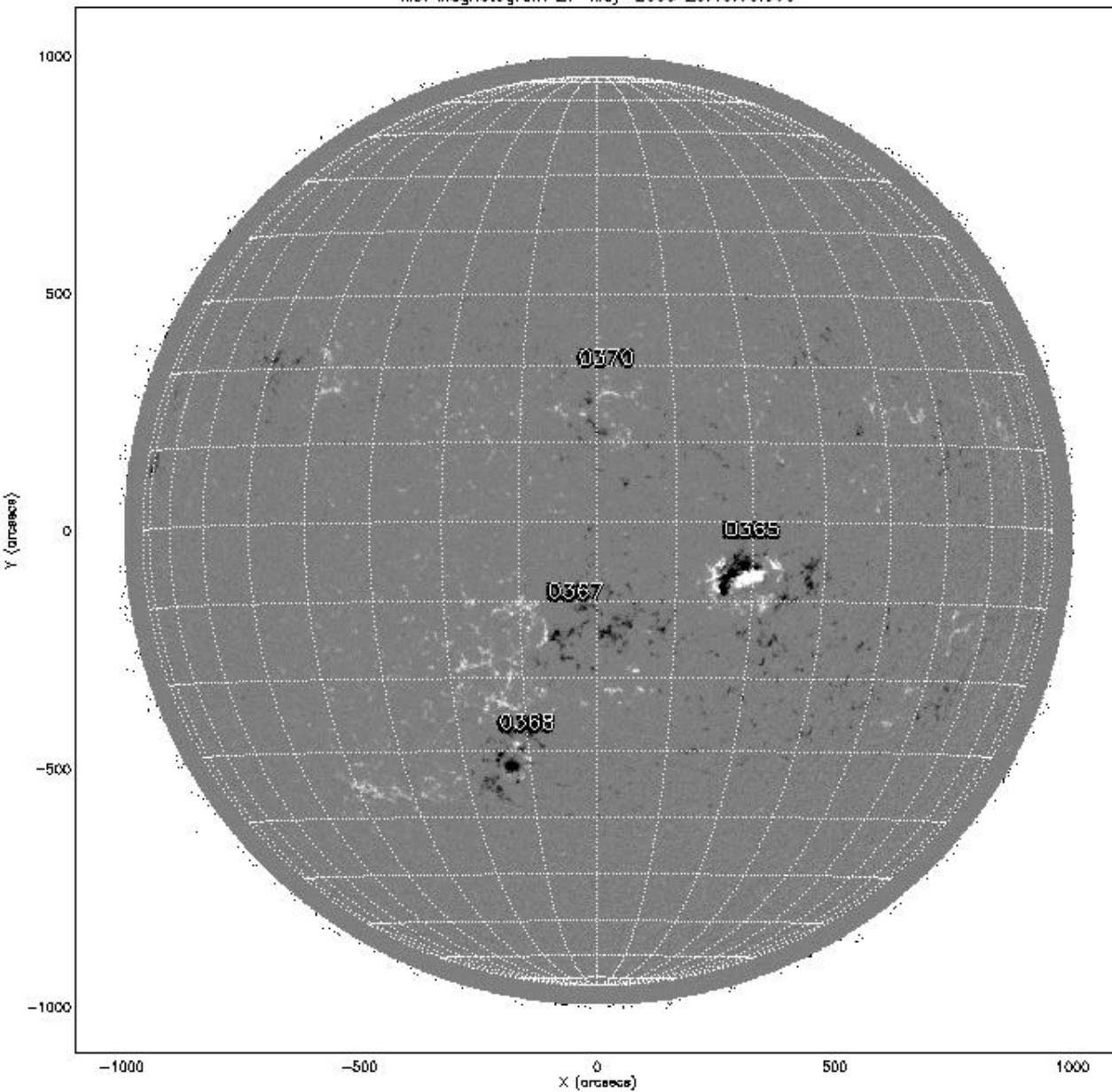
Солнечные вспышки на высотах
15 000 км - 70 000 км
($1/40 - 1/10 R_{\text{Солнца}}$)

Солнечные вспышки появляются высоко в солнечной короне на высоте 15 000 – 70 000 км ($1/40 - 1/10$ радиуса Солнца) над активными областями с большим магнитным полем $\sim 3\ 000$ Гс (на солнечной поверхности поле превышает 1 Гс).

($R_{\text{Солнца}} = 700\ 000 \text{ км}$)

СОЛНЕЧНАЯ ВСПЫШКА ПРОИСХОДИТ В СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЕ НА ВЫСОТАХ 15 – 70 ТЫСЯЧ КИЛОМЕТРОВ, ЧТО СОСТАВЛЯЕТ 1/40 – 1/10 РАДИУСА СОЛНЦА

MDI Magnetogram 27-May-2003 20:48:00.000

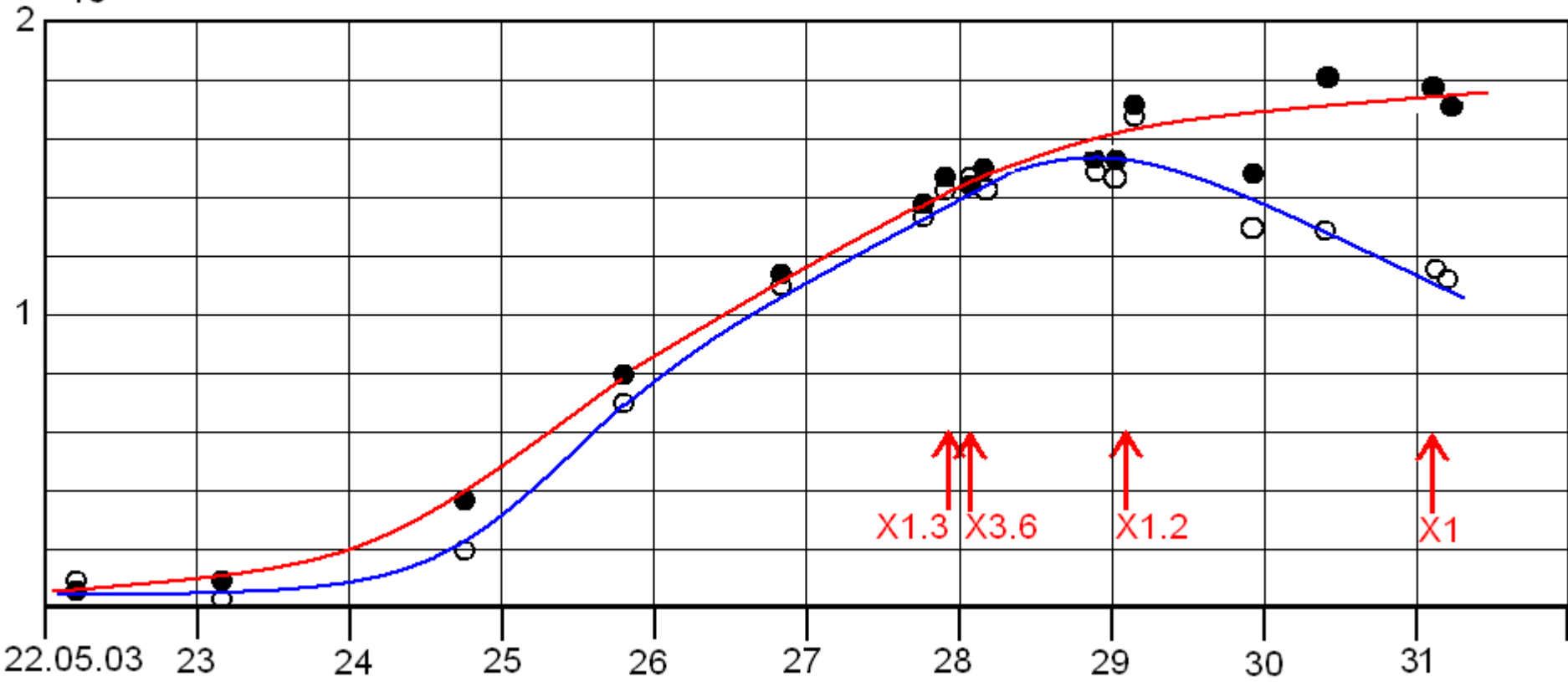


AR 10365

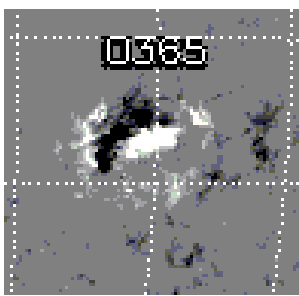
$\times 10^{22} \text{ Mx}$

● Φ_N

○ Φ_S



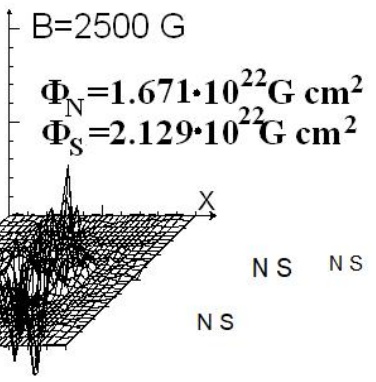
FLARES: X1.3 23:07 S07W16; X3.6 00:27S07W20; X1.2 01:05; X1 02:24 S06W59



NOAA 11429
X5.4
N18 E31
07-03-2012

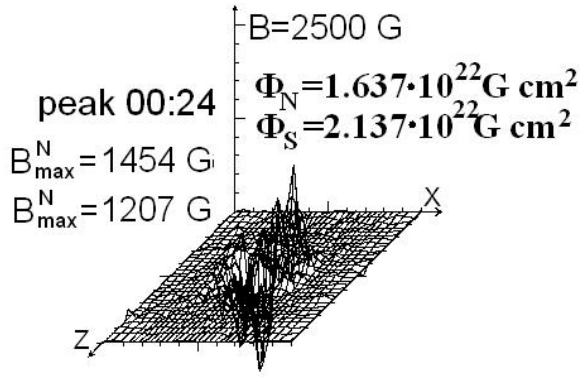
00:02:15

start 00:02
 $B_{\max}^N = 1497 \text{ G}$
 $B_{\max}^S = 1236 \text{ G}$



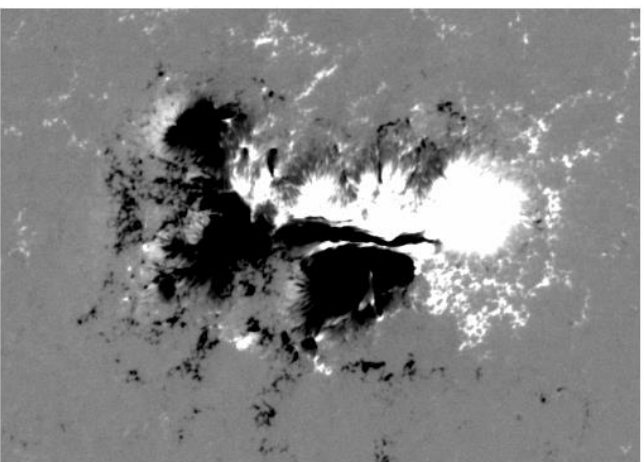
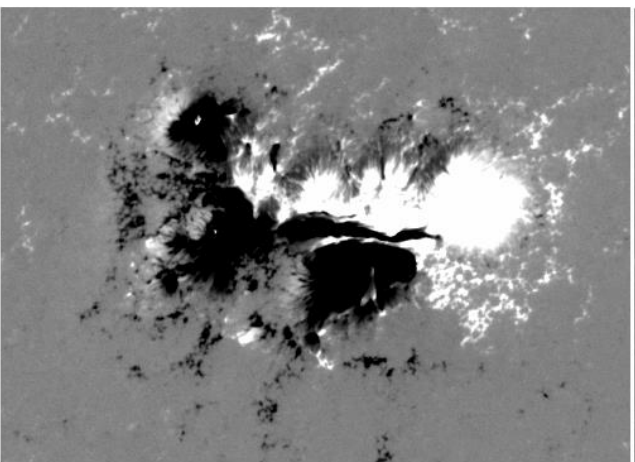
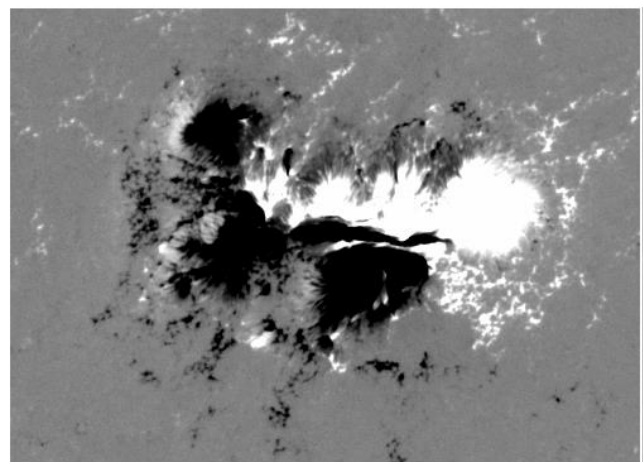
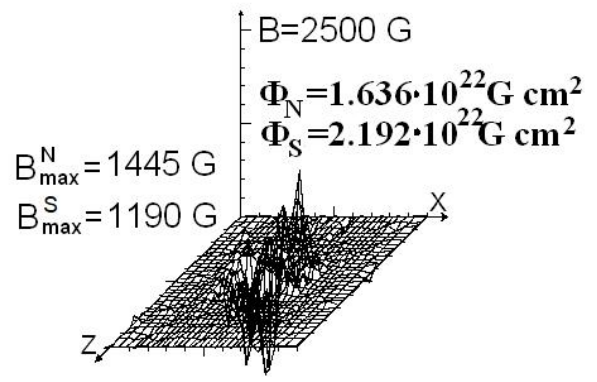
00:24:00

peak 00:24
 $B_{\max}^N = 1454 \text{ G}$
 $B_{\max}^S = 1207 \text{ G}$



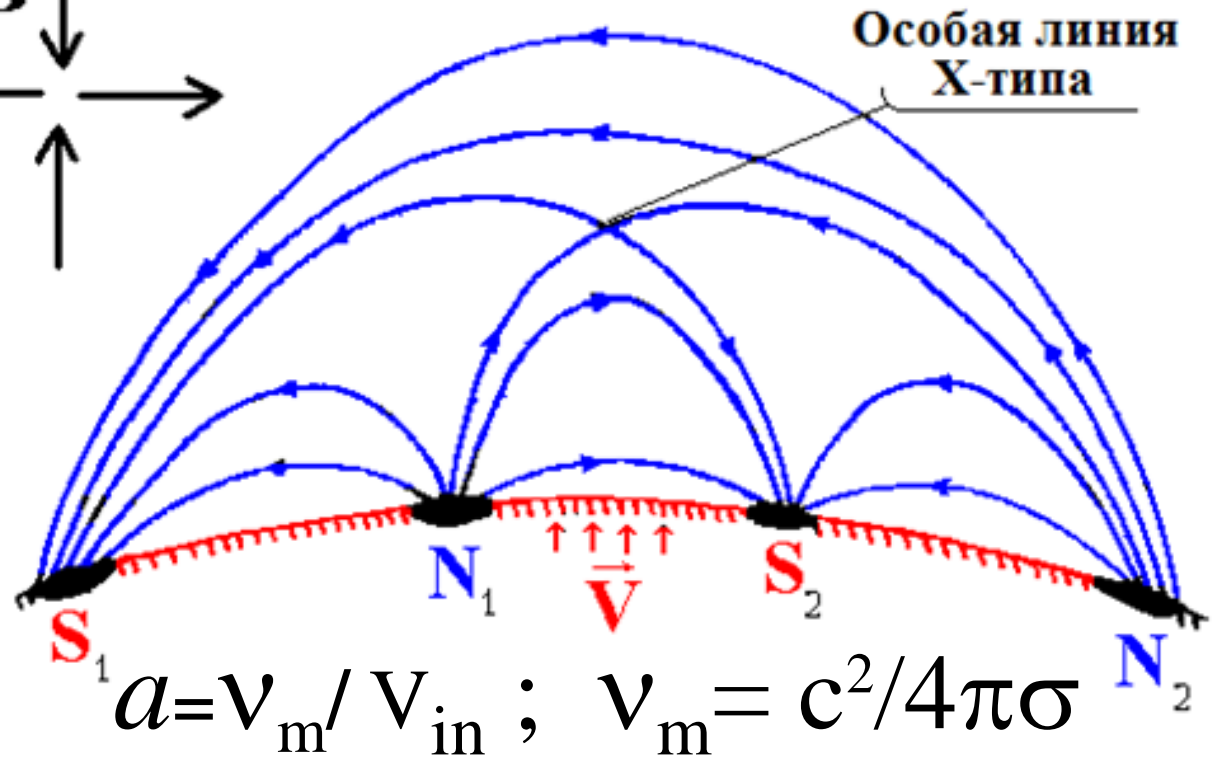
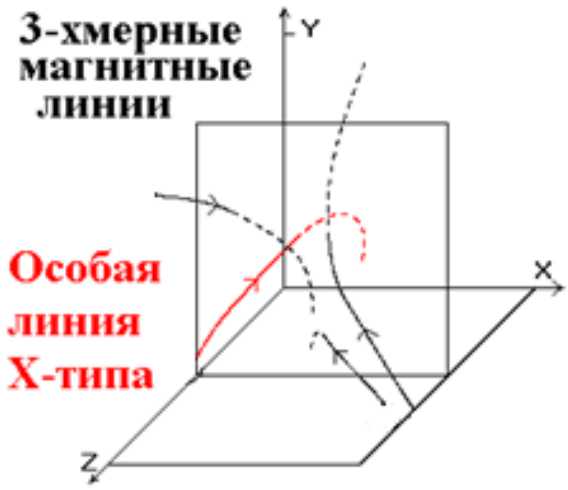
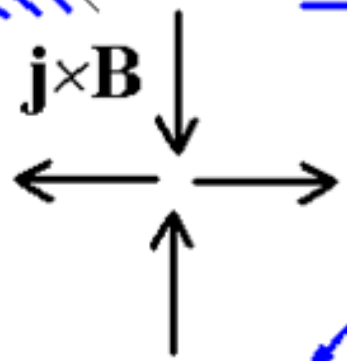
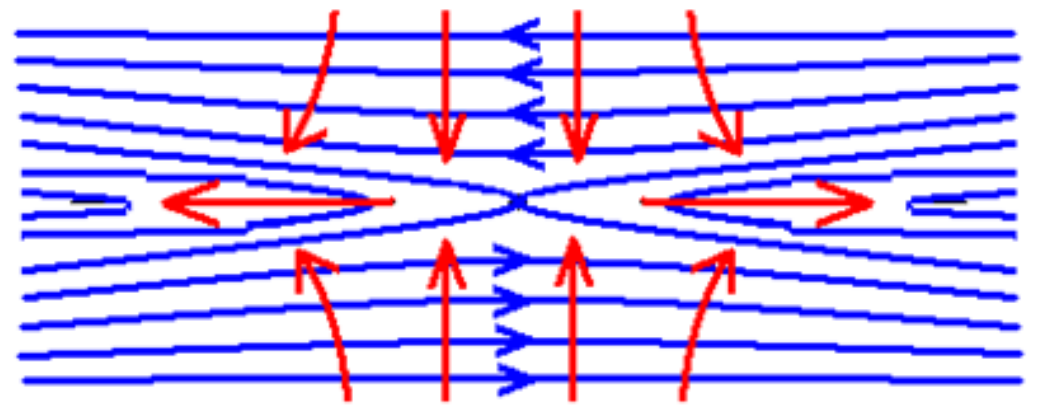
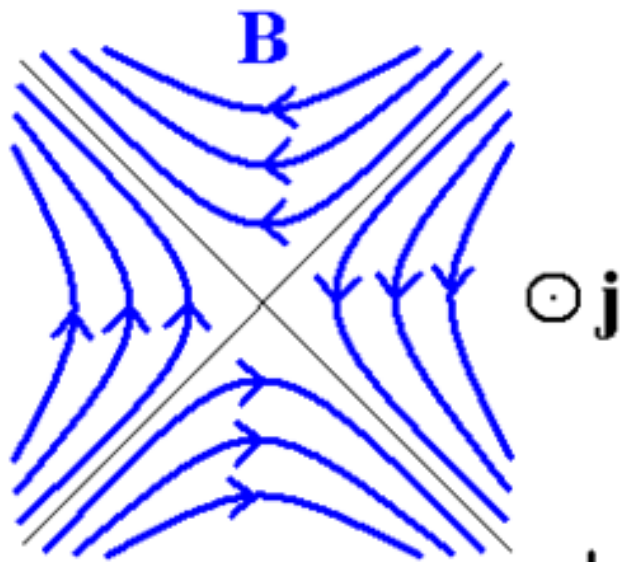
00:39:00

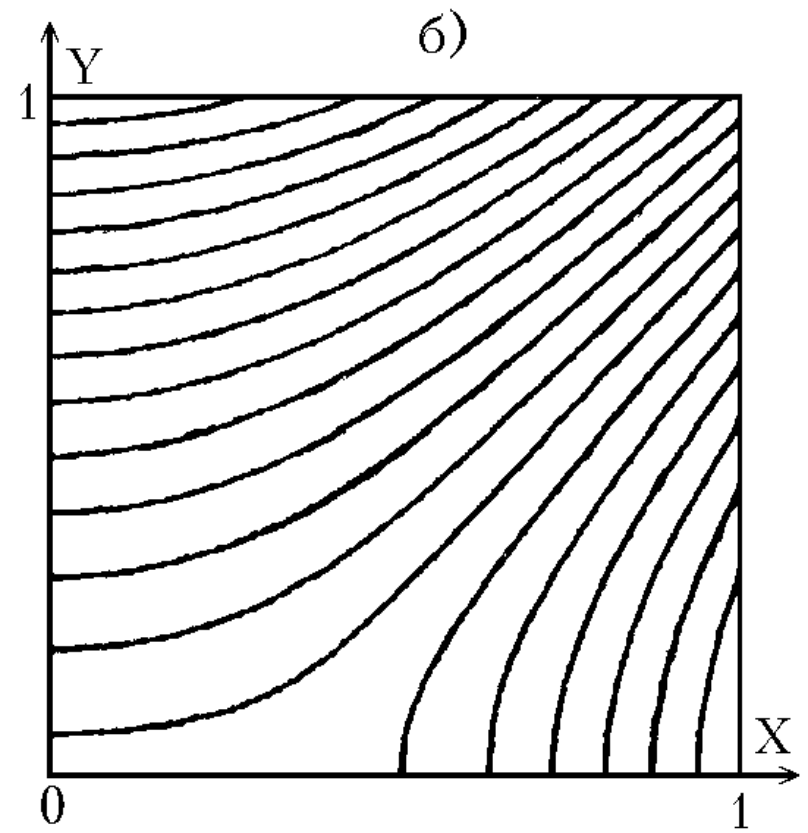
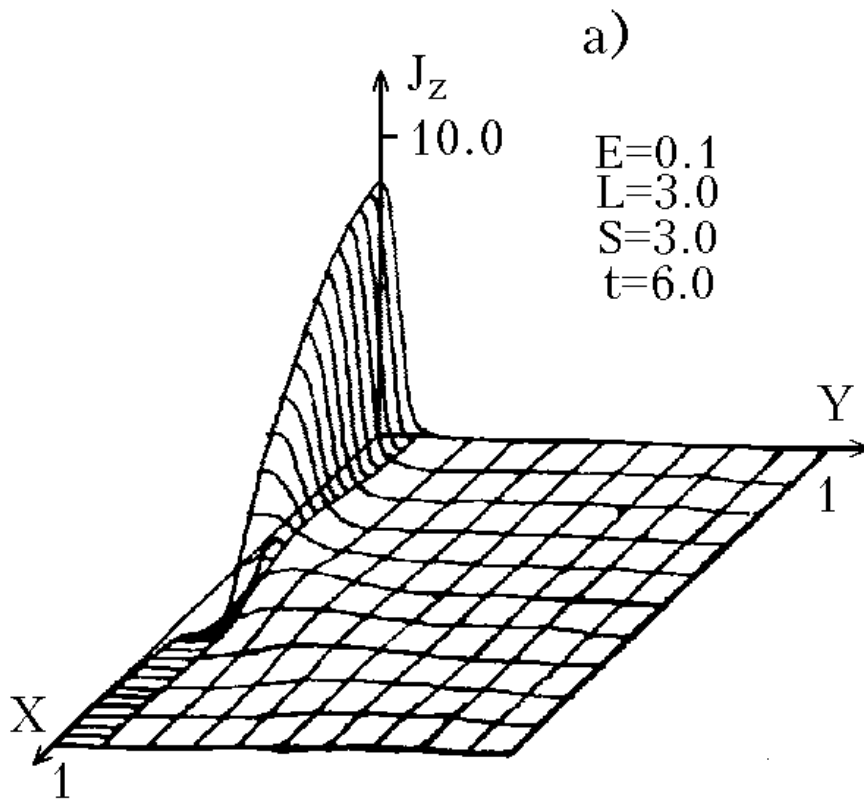
$B_{\max}^N = 1445 \text{ G}$
 $B_{\max}^S = 1190 \text{ G}$



Подгорный, Подгорный, Мешалкина. АЖ. 92, 669, 2015.

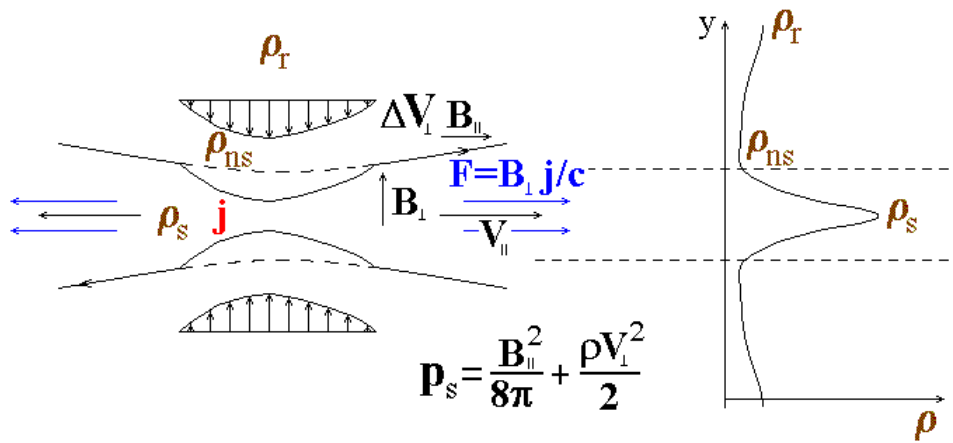
С. И. Сыроватский 1966
 A. Bratenahl, W. Hirsch 1966





Подгорный А.И., Сыроватский С.И. 1979

Неустойчивость токового слоя



Условие падения полной массы плазмы слоя во времени:

$$\frac{V_{in} \rho_r b}{V_{out} \rho_s a} = \left(\frac{V_{in}}{V_A} \right)^2 \text{Re}_m \sqrt{\frac{\rho_r}{\rho_s}} < 1$$

$$\rho_s \frac{dD_V}{dt} = -D_V A \rho_s + D_B \frac{B_s}{4\pi a} + V_{in1} K_I \frac{B_s h}{4\pi \nu_m} + \rho_1 \left(\frac{T_s}{b_1^2} - A^2 \right)$$

$$\rho_{ns} \frac{dV_{in1}}{dt} = V_{in1} K_V \frac{\rho_{ns} V_{in0}}{a} - \rho_1 K_p \frac{T_s}{a} - D_B \frac{B_s}{4\pi}$$

$$\frac{d\rho_1}{dt} = -\rho_1 A - D_V \rho_s + V_{in1} \frac{\rho_{ns}}{a}$$

$$\frac{dD_B}{dt} = -2D_V h - D_B \left(A + \frac{\nu_m}{b_1^2} + \frac{\nu_m}{a^2} \right) + V_{in1} \frac{B_s}{b_1^2} K_B$$

$$A = \frac{\partial V_x}{\partial x} = \frac{V_{out}}{b} = \sqrt{\frac{1}{ab} \frac{B_s B_n}{4\pi \rho_s}}; \quad h = \frac{\partial B_{y0}}{\partial x} = \frac{B_n}{b};$$

$$\frac{\partial V_{x1}}{\partial x} = D_V; \quad \frac{\partial B_{y1}}{\partial x} = D_B$$

Максимальный инкремент неустойчивости токового слоя:

$$\gamma_{max} = \frac{1}{2} \text{Re}_m^{-1} \epsilon_v^{-2} + \sqrt{\left(\frac{1}{2} \text{Re}_m^{-1} \epsilon_v^{-2} \frac{\rho_r}{\rho_s} \right)^2 + K_B \text{Re}_m^{-1} \epsilon_v^{-2} \left(\frac{\rho_r}{\rho_s} \right)^{1/2} - 2 \frac{\rho_r}{\rho_s} - \sqrt{\frac{\rho_r}{\rho_s}}}$$

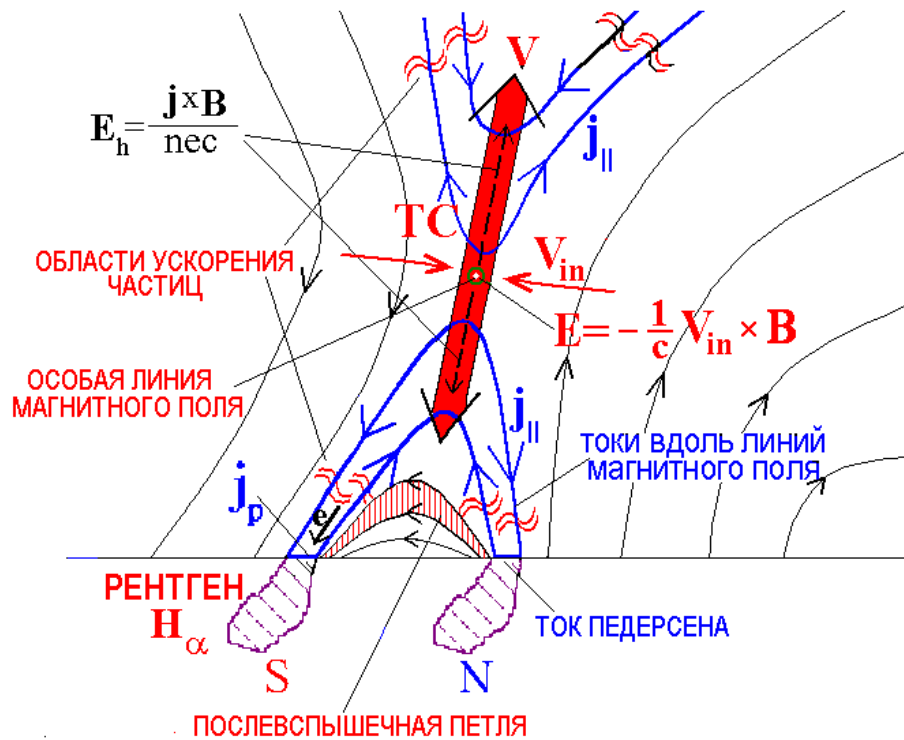
Условие неустойчивости токового слоя $\gamma_{max} > 0$ имеет вид:

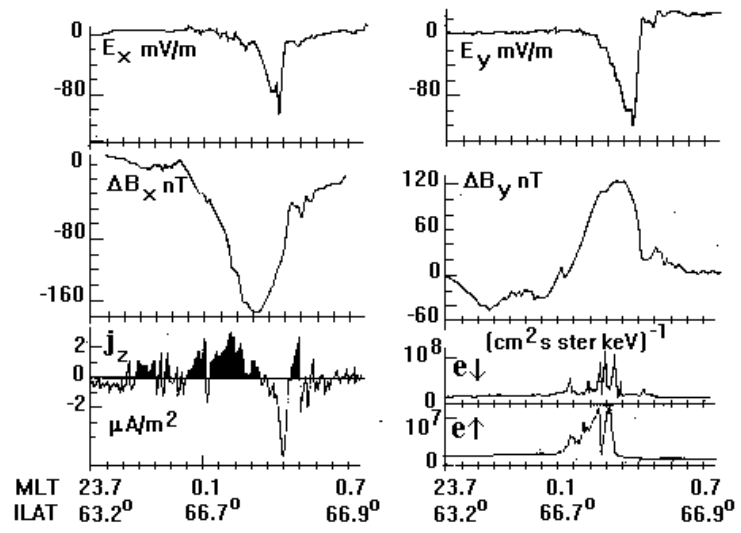
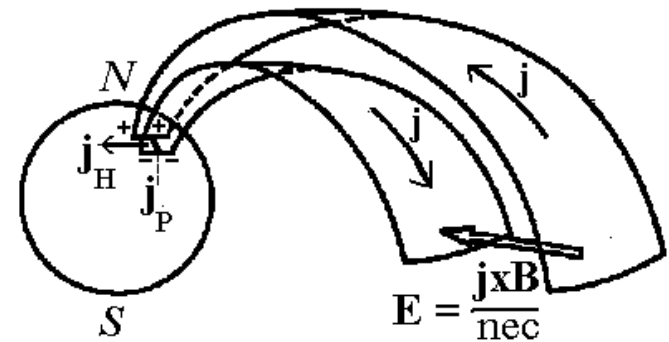
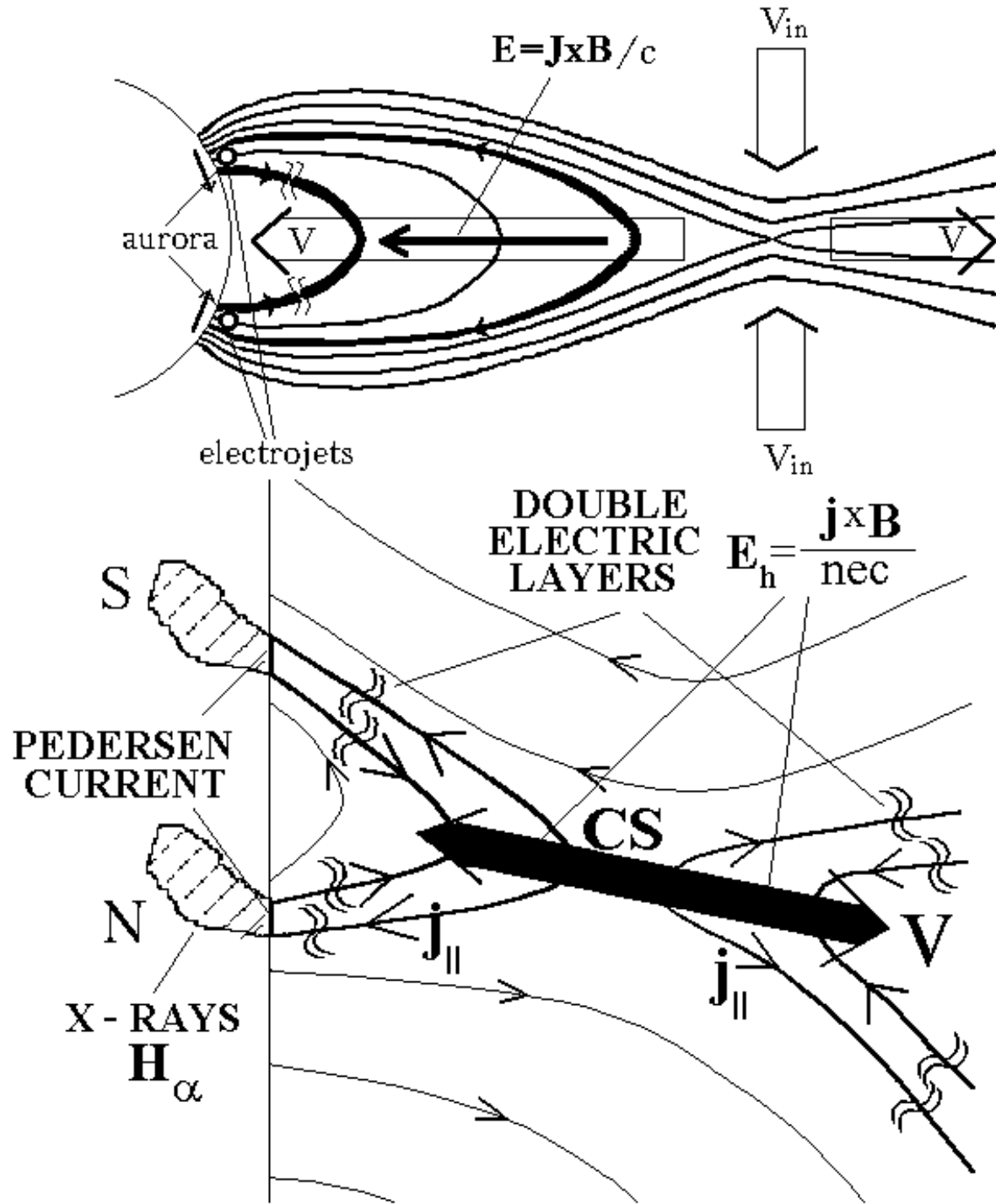
$$\epsilon_v^2 \text{Re}_m \sqrt{\frac{\rho_r}{\rho_s} \frac{\rho_{ns}}{\rho_r} \frac{1}{K_B}} < \frac{1}{2} \quad (K_B \lesssim 1)$$

Продолжается выполнение планов Игоря Максимовича Подгорного.

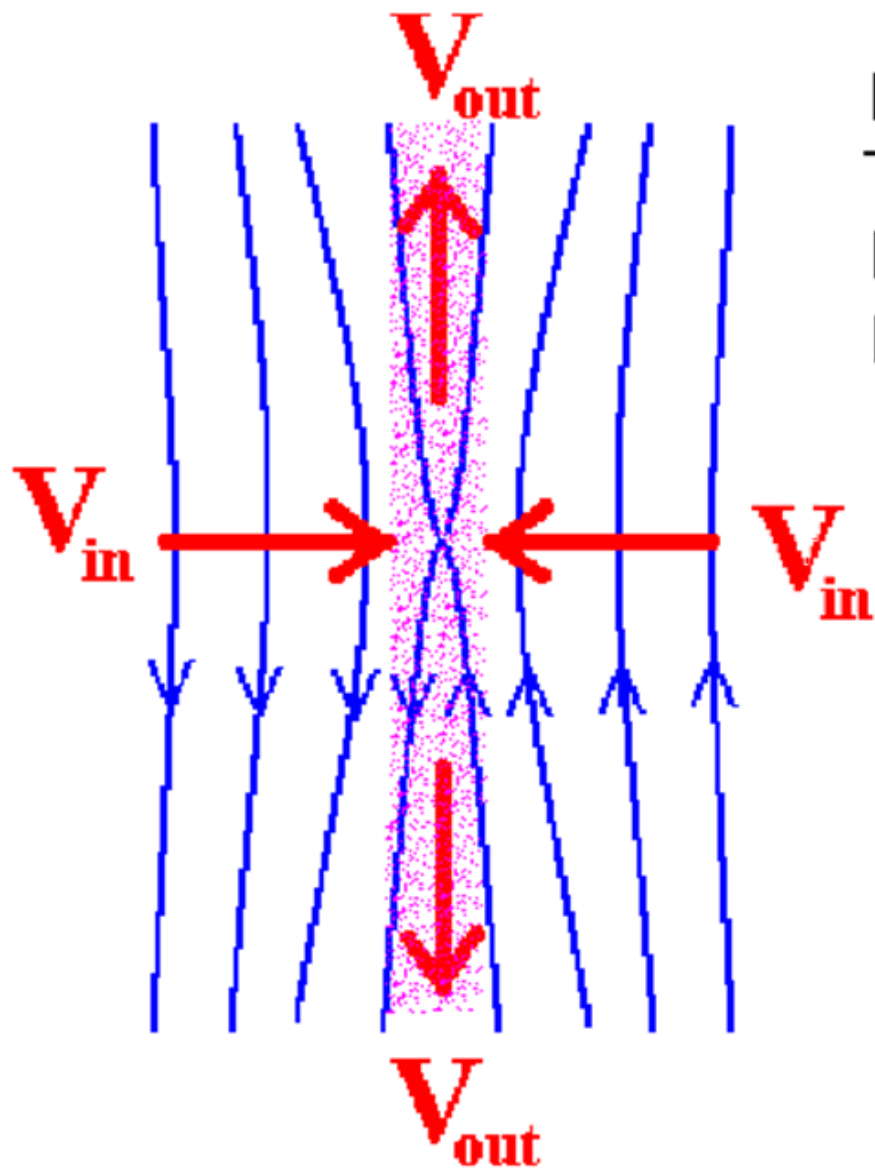
Электродинамическая модель солнечной вспышки.

И.М. Подгорный по результатам измерений на спутнике Интеркосмос-Болгария-1300





На основании измерений, выполненных на Советско-Болгарском космическом аппарате Интеркосмос Болгария-1300, Игорем Максимовичем предложена электродинамическая модель суббури.



From RHESSI: $(ME)=5 \cdot 10^{49} \text{ cm}^{-3}$.

$T=3.1 \text{ keV}$ $n=10^{11} \text{ cm}^{-3}$.

$B^2/8\pi = nkT \rightarrow B = 110 \text{ G}$.

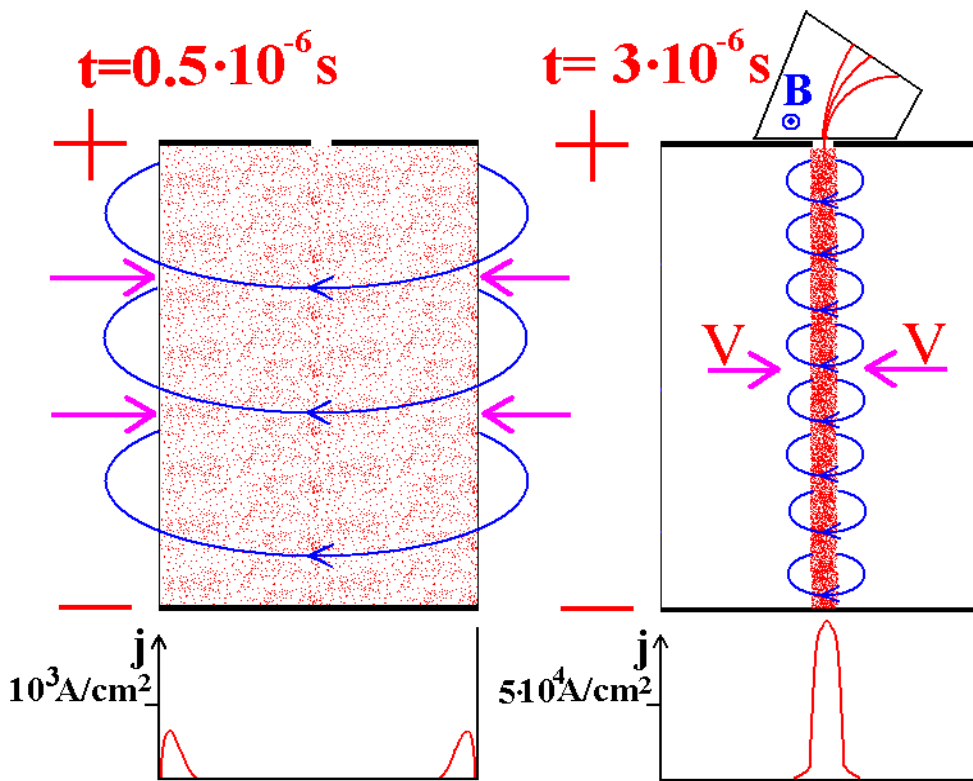
$M = Nm_p \sim 10^{15} \text{ g}$ --- CME.

At $V_{in} = 2 \times 10^7 \text{ cm/s}$ and $L = 10^9 \text{ cm}$.

$E = V \times B / c$. $E = 20 \text{ V/cm}$.

$W = 2 \times 10^{10} \text{ eV}$.

Сжатие газового разряда собственным магнитным полем при токах в сотни кА приводит к генерации электрического поля Лоренца, направленном вдоль оси разряда. Энергия ускоренных частиц ~ 300 кэВ при приложенной разности потенциалов ~ 15 кВ.



$\Phi = 15 \text{ kV}$
 $dI/dt = 10^{11} \text{ A/s}$
 $I_{\text{max}} = 200 \text{ kA}$
 $W > 300 \text{ keV}$
 $\mathbf{E} = -\mathbf{V} \times \mathbf{B} / c$
 $V \sim 10^7 \text{ cm/s}$
 $B_{\text{max}} \sim 4 \cdot 10^4 \text{ G}$
 $E \sim 4 \cdot 10^3 \text{ V/cm}$

Lab. № 2. 1954.

Atomnaja energija

№ 3. 1956.

Artsimovich et. al. P. 84.

Lukjanov, Podgorny. P. 93.

НИЯФ МГУ 1957.

Podgorny, Kovalsky,

Palchikov.

DAN SSSR. 123, 825 (1958).

1957.

Severny } Electric discharge

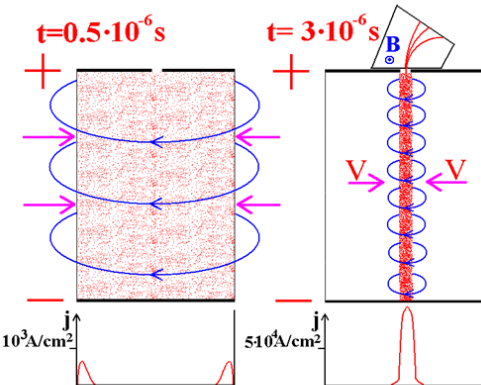
Toneman } in solar corona.

С. Н. Вернов

Механизм генерации космических лучей

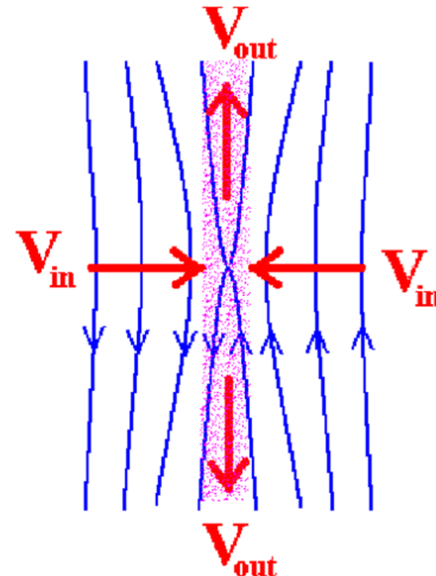
Игоря Максимовича Подгорного

Механизм И. М. Подгорного осуществляет ускорение заряженных частиц индукционным электрическим полем, равным полю $V \times B/c$ вблизи основного тока, создающего поле B . Механизм ускоряет заряженные частицы в пинче и в токовом слое (происходящий при этом физический процесс диссипации магнитного поля в тонком слое тока, образовавшемся в конфигурации магнитного поля X-типа, иногда называют процессом пересоединения, однако применять такое название необязательно). В месте ускорения магнитное поле равно нулю или направлено параллельно электрическому. Ускорение заряженных частиц электрическим полем в токовом слое приводит к генерации солнечных космических лучей во время солнечных вспышек и к генерации галактических космических лучей во время мощных вспышек на звездах.



$\Phi = 15 \text{ kV}$
 $dI/dt = 10^{11} \text{ A/s}$
 $I_{\text{max}} = 200 \text{ kA}$
 $W > 300 \text{ keV}$
 $E = -V \times B/c$
 $V \sim 10^7 \text{ cm/s}$
 $B_{\text{max}} \sim 4 \cdot 10^4 \text{ G}$
 $E \sim 4 \cdot 10^3 \text{ V/cm}$

Lab. № 2. 1954.
 Atomnaja energija
 № 3. 1956.
 Artsimovich et. al. P. 84.
 Lukjanov, Podgorny, P. 93.
 НИЯФ МГУ 1957.
 Podgorny, Kovalsky,
 Palchikov.
 DAN SSSR. 123, 825 (1958).
 1957.
 Severny } Electric discharge
 Toneman } in solar corona.
 С. Н. Вернов

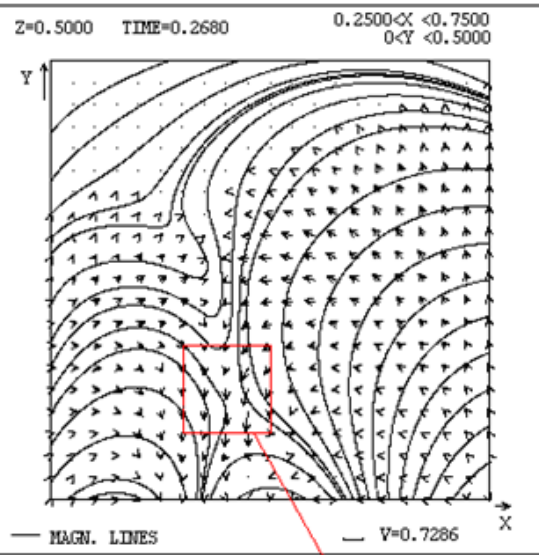


From RHESSI: $(ME) = 5 \cdot 10^{49} \text{ cm}^{-3}$
 $T = 3.1 \text{ keV}$ $n = 10^{11} \text{ cm}^{-3}$
 $B^2/8\pi = nKT \rightarrow B = 110 \text{ G}$
 $M = Nm_p \sim 10^{15} \text{ g}$ --- CME.

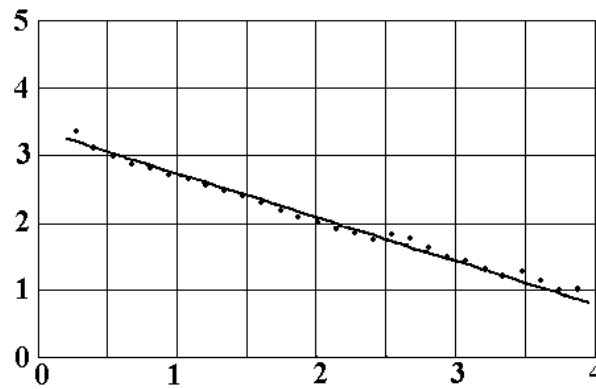
At $V_{\text{in}} = 2 \times 10^7 \text{ cm/s}$ and $L = 10^9 \text{ cm}$.
 $E = V \times B/c$. $E = 20 \text{ V/cm}$.

$W = 2 \times 10^{10} \text{ eV}$.

Изучение СКЛ может расширить наши представление о механизме генерации космических в общем случае, поскольку галактические космические лучи могут генерироваться во время супервспышек на звездах, которые имеют ту же природу, что и солнечных вспышки. Энергия супервспышек на звездах карликах класса G может достигать 10^{36} эрг (по сравнению с энергией солнечной вспышки 10^{32} эрг), а энергия генерируемых ими космических лучей может достигать 10^{15} эВ.



Область, в которой проводится расчет ускоренных частиц



$$dI/dE \sim \exp(-E/E_0) \quad E_0=0.6 \text{ GeV}$$

The rate of reconnection for $E_0 \sim 0.6 \text{ GeV}$ is order of 10^7 cm/s .

$$E = V_{in} B/c$$

Подгорный, Балабин, Вашенюк, Подгорный
Астр. Журн. Т. 87, С. 704 (2010)

Podgorny, Balabin, Podgorny, Vashenyuk
Journ. Atm. Solar-Ter. Phys. V. 72. P. 988 (2010)

Необходимо путем проведения МГД моделирования в короне над активной областью более точно определить электрическое и магнитное поле в месте вспышечного освобождения энергии и окружающем пространстве, чтобы путем расчета траекторий заряженных частиц в полученных полях изучить механизм ускорения космических лучей и возможность их выхода из сильного магнитного поля над активной областью.

Поскольку нет информации о плазменных неоднородностях, а, следовательно, коэффициент диффузии в уравнении распространения ускоренных частиц неизвестен, прогноз появления в межпланетном пространстве космических лучей, способных вызвать облучение космонавтов, предполагается проводить на основании времен прихода, полученных И. М. Подгорным (JASTP 2018. V. 180. P. 9.) при помощи анализа наблюдательных данных.

Наша цель:

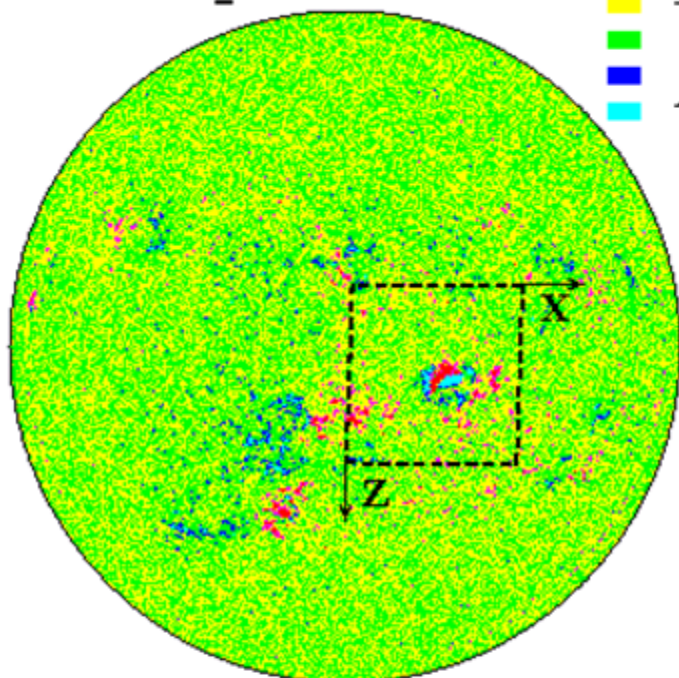
Определить механизм солнечной вспышки непосредственно путем МГД моделирования в короне над реальной активной областью.

При постановке задачи никаких предположений о механизме вспышки не делается. Все условия берутся из наблюдений.

27-05-2003 20:47:59
 fd_M_96m_01d.3789.0013.fits
 B_0 = -1.1810

В в Гауссах

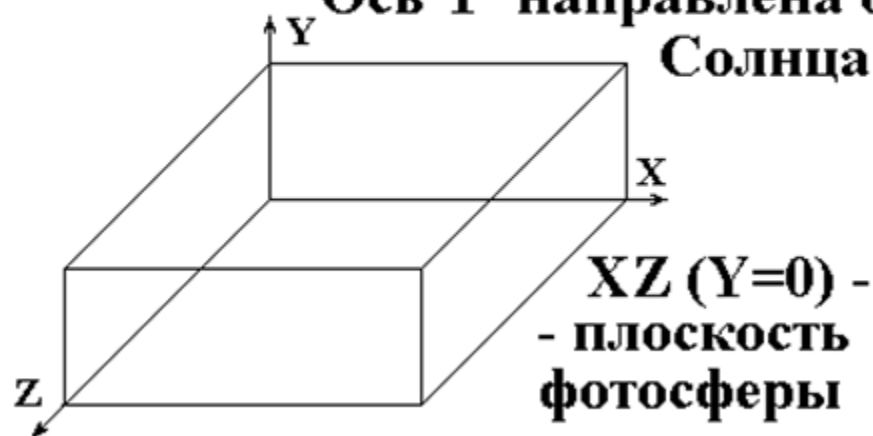
■	$B < -150$
■	$-150 < B < -50$
■	$-50 < B < 0$
■	$0 < B < 50$
■	$50 < B < 150$
■	$150 < B$



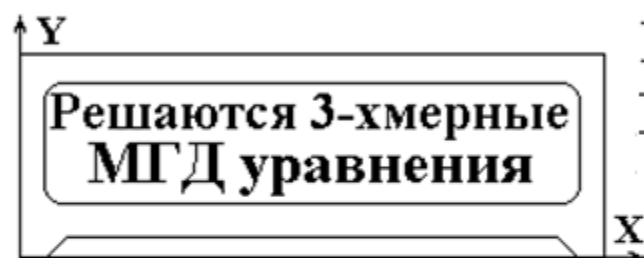
--- ОБЛАСТЬ В КАРТИННОЙ ПЛОСКОСТИ

РАСЧЕТНАЯ ОБЛАСТЬ В КОРОНЕ НАД АКТИВНОЙ ОБЛАСТЬЮ

Ось Y направлена от Солнца



Сечение Z=const



Нефотосферная граница:

B_{\perp} из $\text{div} \mathbf{B} = 0$
 B_{\parallel} из $\partial j / \partial n = 0$
 $\partial \rho / \partial n = 0$
 $\partial V / \partial n = 0$
 $\partial T / \partial n = 0$

Фотосферная граница:

B_{\parallel} из вычисленного потенц. поля для наблюдаемого
 B вдоль луча зрения; B_{\perp} из $\text{div} \mathbf{B} = 0$; $\rho = \text{const}$;
 $\partial V / \partial n = 0$; $\partial T / \partial n = 0$

($V = 0$
 $T = \text{const}$
 $B_{\parallel} = \text{const}$)

Численное трехмерное моделирование в короне над активной областью. Решается система МГД уравнений для сжимаемой плазмы с диссипативными членами и анизотропной теплопроводностью. Численная неустойчивость стабилизируется введением искусственной вязкости.

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \text{rot}(\mathbf{V} \times \mathbf{B}) - \frac{1}{\text{Re}_m} \text{rot} \left(\frac{\sigma_0}{\sigma} \text{rot} \mathbf{B} \right) - \text{rot}(\nu_{m_Art} \text{rot} \mathbf{B}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\text{div}(\mathbf{V} \rho) \quad (2)$$

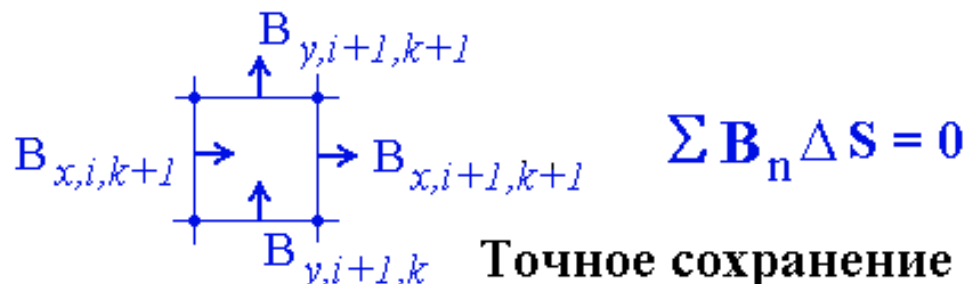
$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} = -(\mathbf{V}, \nabla) \mathbf{V} - \frac{\beta_0}{2\rho} \nabla(\rho T) - \frac{1}{\rho} (\mathbf{B} \times \text{rot} \mathbf{B}) + \frac{1}{\text{Re}_\rho} \Delta \mathbf{V} + G_g \mathbf{G} + \nu_{Art} \Delta \mathbf{V} \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -(\mathbf{V}, \nabla) T - (\gamma - 1) T \text{div} \mathbf{V} + (\gamma - 1) \frac{2\sigma_0}{\text{Re}_m \sigma \beta_0 \rho} (\text{rot} \mathbf{B})^2 - (\gamma - 1) G_q \rho L'(T) + \frac{\gamma - 1}{\rho} \text{div} \left(\mathbf{e}_{\parallel} \kappa_{dl}(\mathbf{e}_{\parallel}, \nabla T) + \mathbf{e}_{\perp 1} \kappa_{\perp dl}(\mathbf{e}_{\perp 1}, \nabla T) + \mathbf{e}_{\perp 2} \kappa_{\perp dl}(\mathbf{e}_{\perp 2}, \nabla T) \right) \quad (4)$$

**Для численного решения
МГД уравнений
разработана
программа ПЕРЕСВЕТ**

A.I. Podgorny Solar Phys. 156,41,1995.
A.I. Podgorny, I.M. Podgorny
Solar Phys. 139, 125, 1992 Cosmic Research 35, 35, 1997
161, 165, 1995 35, 235, 1997
182, 159, 1998 36, 492, 1998
207, 323, 2002
Astronomy Reports 42, 116, 1998 45, 60, 2001 48, 435, 2004
43, 608, 1999 46, 65, 2002 49, 837, 2005
44, 407, 2000 47, 696, 2003 52, 666, 2008
Comput. Mathem. Mathematical Phys 44, 1784, 2004 54, 645, 2010

Конечно-разностная схема консервативна относительно магнитного потока.



Точное сохранение $[\text{div } \mathbf{B}] = 0$: уравнения

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \text{rot}(\mathbf{V} \times \mathbf{B}) + \nu_m \Delta \mathbf{B} \quad \text{и}$$

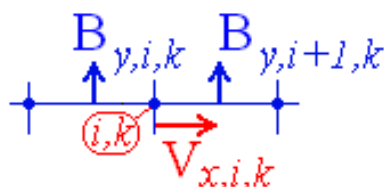
$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \text{rot}(\mathbf{V} \times \mathbf{B}) - \nu_m \text{rot}(\text{rot} \mathbf{B}) \quad \text{эквивалентны.}$$

При диссипативной релаксации магнитно поля, численное значение плотности тока $[\text{rot } \mathbf{B}] \rightarrow 0$.

Для противопоточной аппроксимации $\text{rot}(\mathbf{V} \times \mathbf{B})$ элементы вектора $\mathbf{V} \times \mathbf{B}$ аппроксимируются:

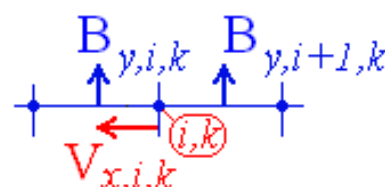
При $V_{x,i,k} > 0$

$$(V_x B_y)_{i,k} = V_{x,i,k} B_{y,i,k}$$



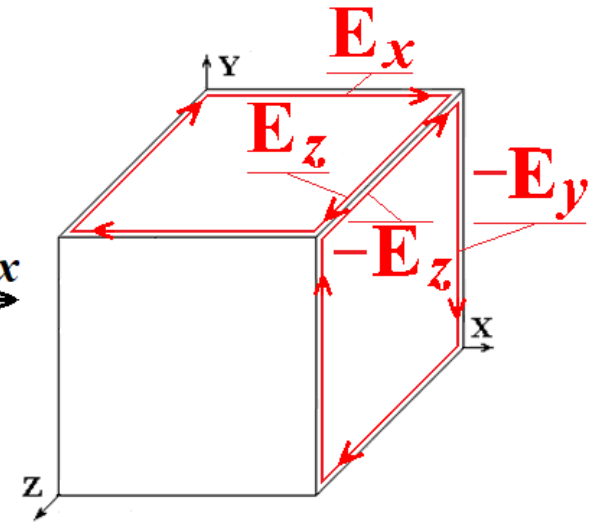
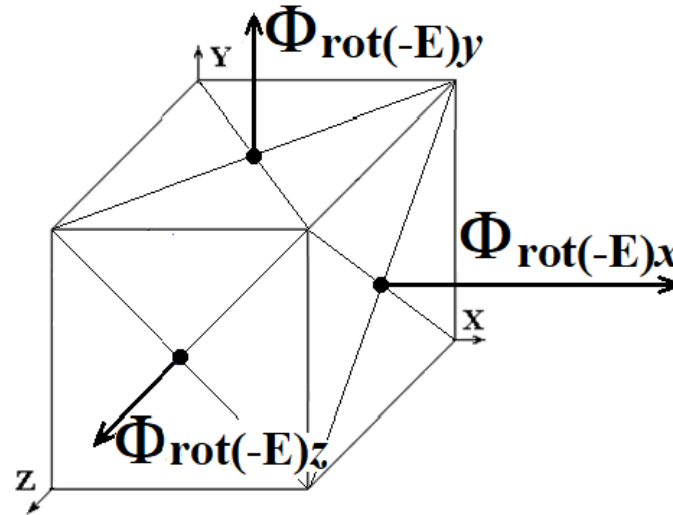
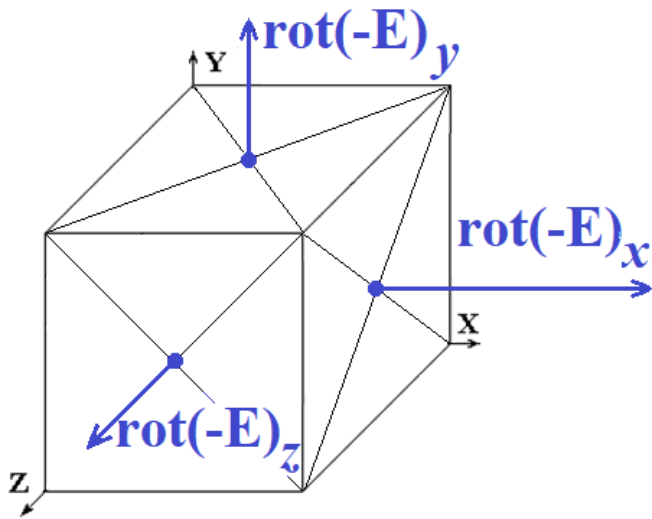
При $V_{x,i,k} < 0$

$$(V_x B_y)_{i,k} = V_{x,i,k} B_{y,i+1,k}$$



Конечно-разностная схема, консервативная относительно магнитного потока

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \text{rot}(-\mathbf{E}) \quad \mathbf{E} = -(\mathbf{V} \times \mathbf{B}) + \frac{1}{\text{Re}_m} \frac{\sigma_0}{\sigma} \text{rot} \mathbf{B} \quad \mathbf{E} = -\mathbf{V} \times \mathbf{B} + \mathbf{v}_m \mathbf{j}$$



$$\text{rot}(-\mathbf{E})_x = \partial E_y / \partial z - \partial E_z / \partial y$$

$$\Phi_{\text{rot}(-\mathbf{E})_x} = \text{rot}(-\mathbf{E})_x S_x = \text{rot}(-\mathbf{E})_x h_y h_z$$

$$\text{rot}(-\mathbf{E})_{x, i+1, j+1, k+1} = (E_{y, i+1, j+1, k+1} - E_{y, i+1, j+1, k}) / h_z + (-E_{z, i+1, j+1, k+1} + E_{z, i+1, j, k+1}) / h_y$$

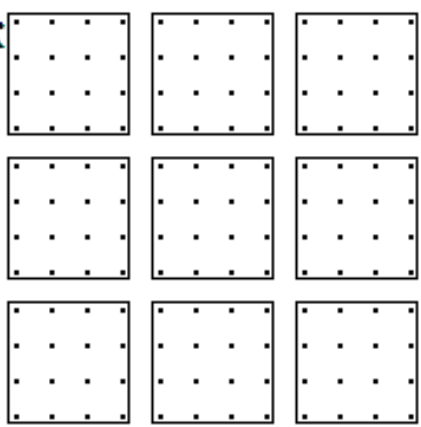
$$\Phi_{\text{rot}(-\mathbf{E})_x, i+1, j+1, k+1} = h_y h_z \text{rot}(-\mathbf{E})_{x, i+1, j+1, k+1} = E_{y, i+1, j+1, k+1} h_y - \underline{E_{z, i+1, j+1, k+1} h_z} - E_{y, i+1, j+1, k} h_y + E_{z, i+1, j, k+1} h_z$$

$$\Phi_{\text{rot}(-\mathbf{E})_y, i+1, j+1, k+1} = h_x h_z \text{rot}(-\mathbf{E})_{y, i+1, j+1, k+1} = \underline{E_{z, i+1, j+1, k+1} h_z} - E_{x, i+1, j+1, k+1} h_x - E_{z, i, j+1, k+1} h_z + E_{x, i+1, j+1, k} h_x$$

Не смотря на использование специально разработанных методов, вычисления выполняются медленно. Поэтому, проведение МГД моделирования на персональном компьютере, (двухядерный процессор 1.6 ГГц) за обозримое время (не годы) быть выполнено только в сильно сокращенном масштабе времени (в 10^4 раз). **Возникает необходимость применения параллельных вычислений.**

Блоки точек
сетки на
примере 2D

(3D
аналогично)



Распараллеливание по технологии **CUDA**

Portland Group (PGI) Fortran

Распараллеливание итераций
при решении МГД уравнений
итерационный переход $j \rightarrow j+1$



нахождение \mathbf{B}

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \text{rot}(\mathbf{V} \times \mathbf{B}) - \text{rot}(\mathbf{v}_m \text{rot} \mathbf{B})$$

нахождение ρ, \mathbf{V}, T

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\text{div}(\mathbf{V} \rho)$$

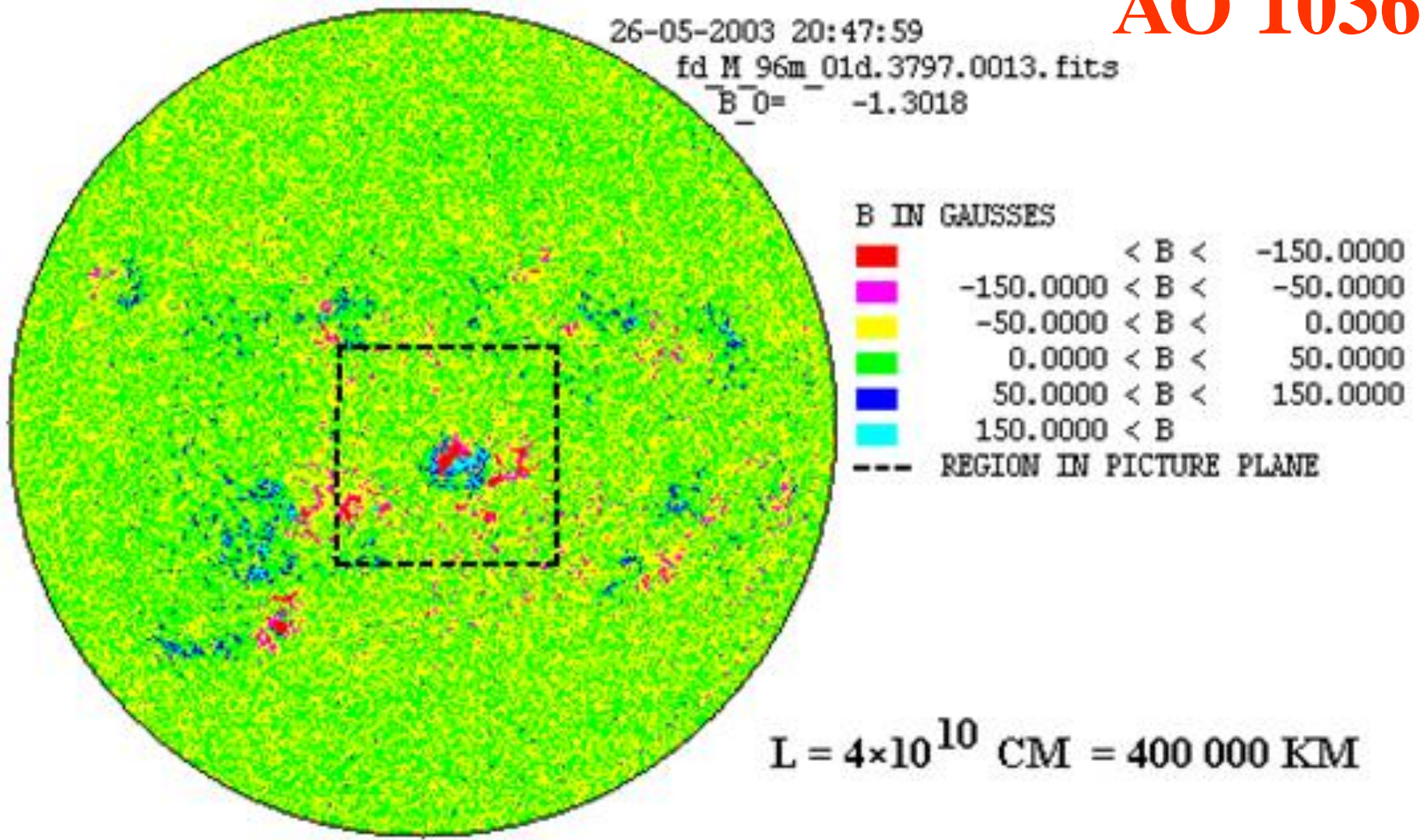
$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} = -(\mathbf{V}, \nabla) \mathbf{V} - \frac{1}{\rho} \nabla(p) + \frac{1}{\rho} (\mathbf{j} \times \mathbf{B}) + \dots$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -(\mathbf{V}, \nabla) T - (\gamma - 1) T \text{div} \mathbf{V} + (\gamma - 1) \frac{\mathbf{v}_m}{\rho} (\text{rot} \mathbf{B})^2 + \dots$$

Аналогично можно будет распараллелить решение уравнения Лапласа $\Delta \Phi = 0$ для нахождения начального потенциального поля и нахождение граничных условий МГД уравнений

ГРУППА ВСПЫШЕК 26-29 МАЯ, 2003 Г.

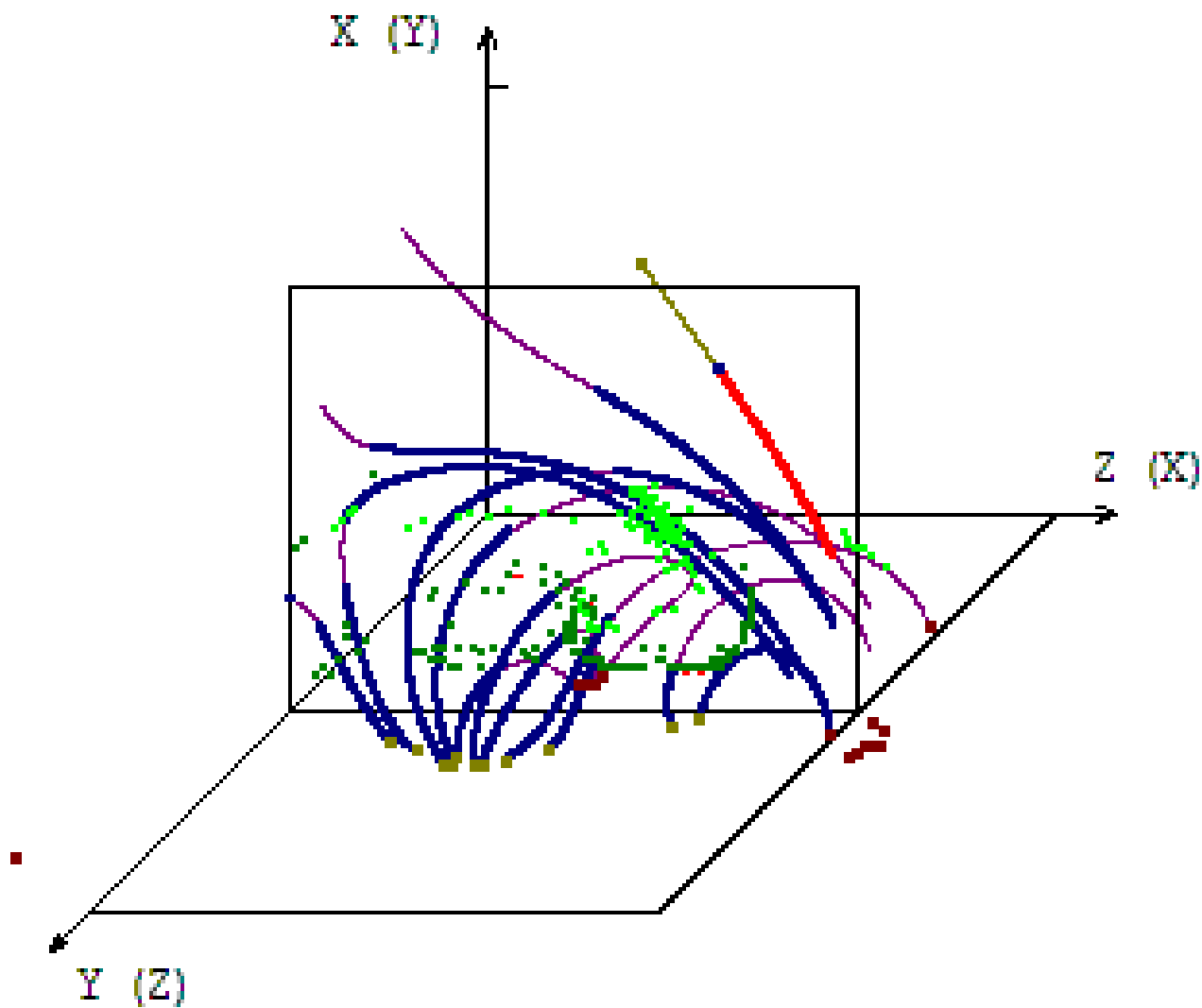
АО 10365



**МГД моделирование над АО 10365 в течение 3-х дней,
начиная с момента 24.05.2003 20:48**

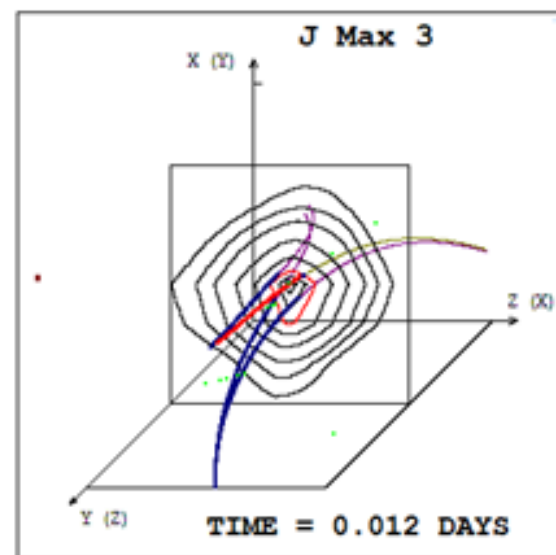
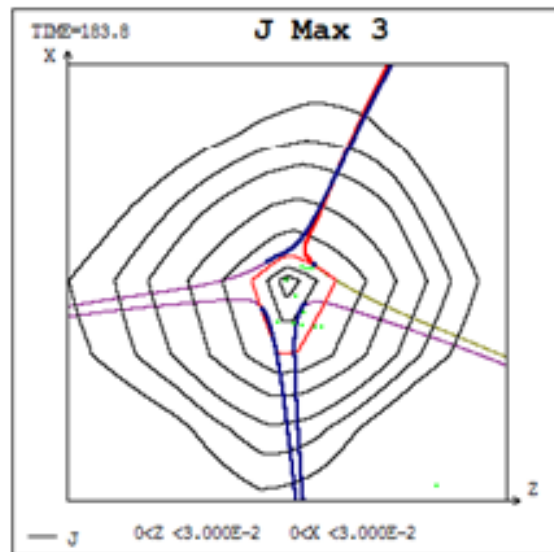
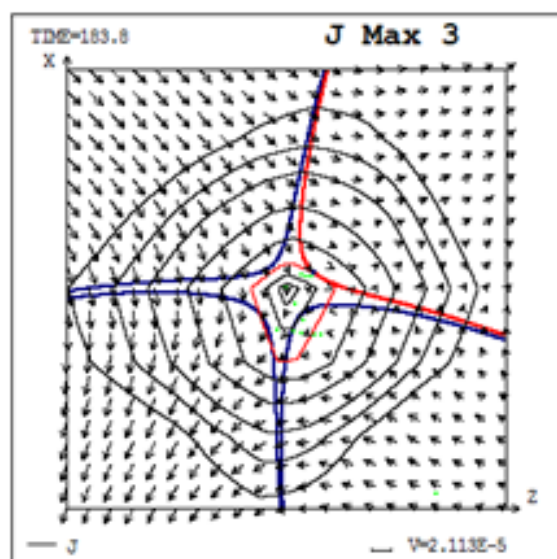
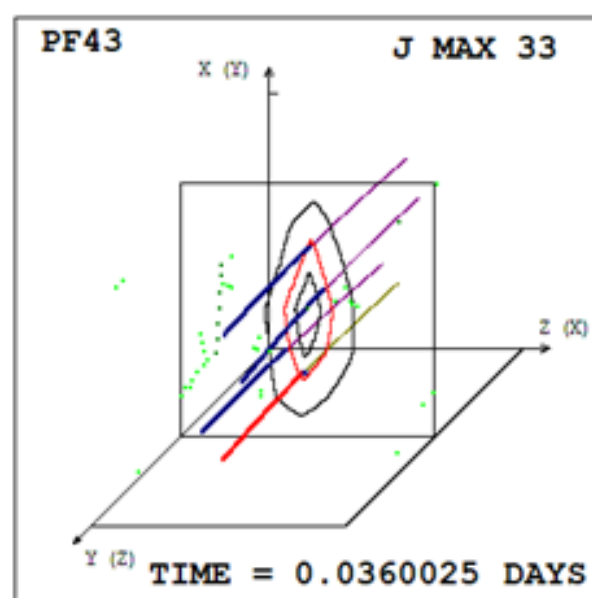
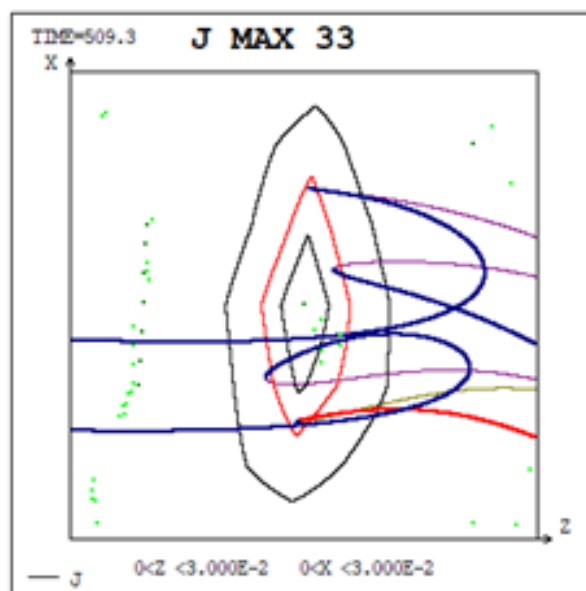
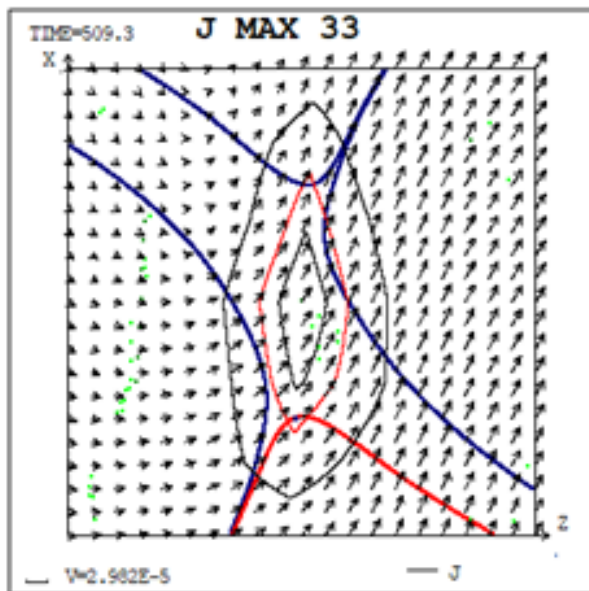
PF43

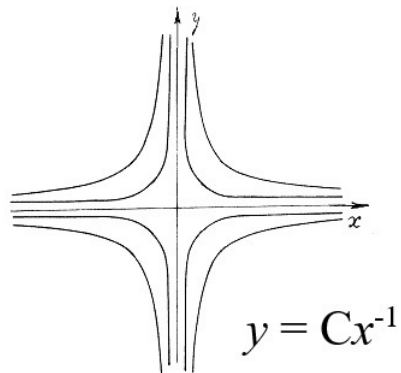
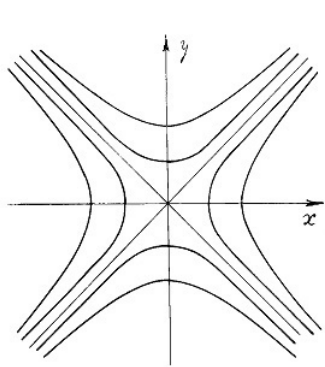
TIME = 0.0360025 DAYS



Создана графическая система поиска положений токовых слоев для сравнения с наблюдаемыми положениями источников теплового рентгеновского излучения.

Для поиска положения токового слоя используется его свойство, согласно которому локальный минимум абсолютной величины плотности тока расположен в центре токового слоя. Находятся все положения локальных максимумов плотности тока. Анализируется конфигурация магнитного поля в окрестности каждого максимума плотности тока. В первую очередь анализируется конфигурация магнитного поля в плоскости, расположенной перпендикулярно вектору магнитного поля в точке этого максимума, в которой конфигурация магнитного поля токового слоя наиболее ярко выражена.

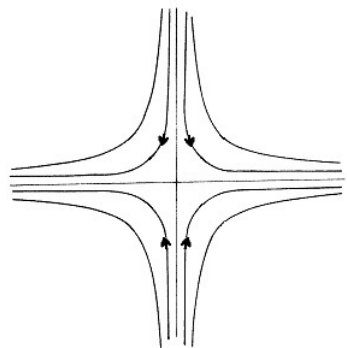




$$\nabla \mathbf{B} = \begin{pmatrix} \frac{dB_x}{dx} & \frac{dB_x}{dy} & \frac{dB_x}{dz} \\ \frac{dB_y}{dx} & \frac{dB_y}{dy} & \frac{dB_y}{dz} \\ \frac{dB_z}{dx} & \frac{dB_z}{dy} & \frac{dB_z}{dz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{dB_x}{dx} & \frac{dB_x}{dy} \\ \frac{dB_y}{dx} & \frac{dB_y}{dy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix}$$

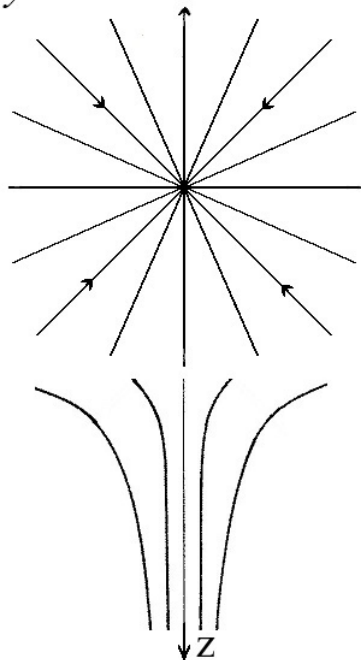
$y = Cx^\alpha, \quad \alpha = \lambda_2/\lambda_1$

$y = Cx^{-1}$

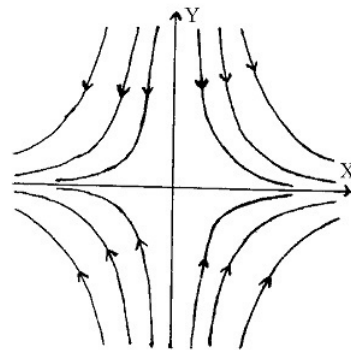


+

$y = Cx$

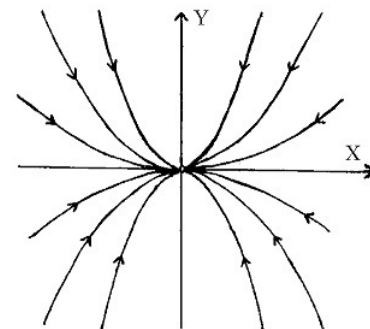


=



$\alpha < 0$

λ_1 и λ_2
разных знаков

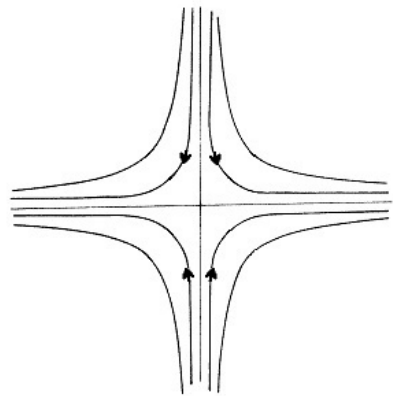


$\alpha > 0$

λ_1 и λ_2
одного знака

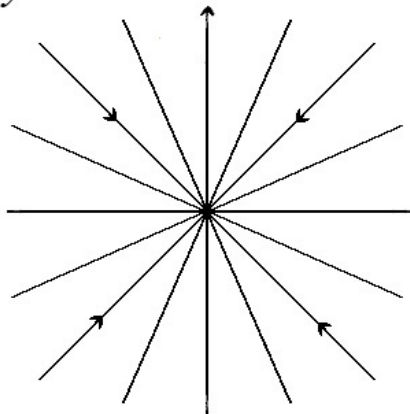
$y = Cx^\alpha, \quad \alpha = \lambda_2/\lambda_1$

$$y = Cx^{-1}$$

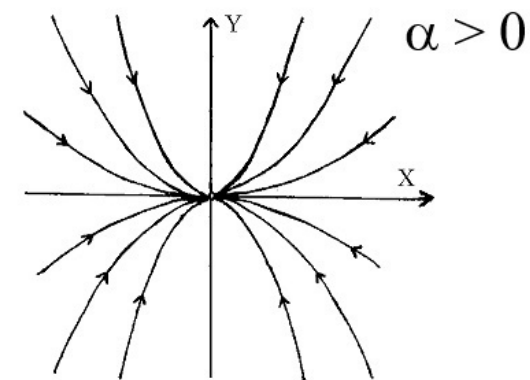
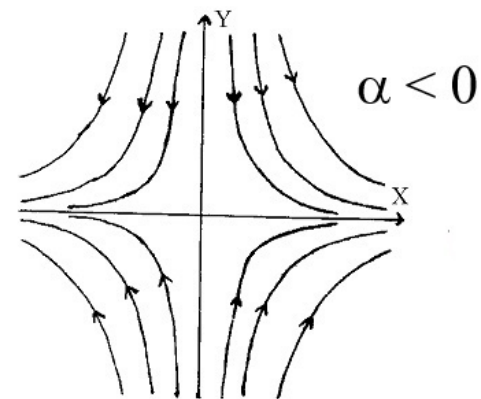


+

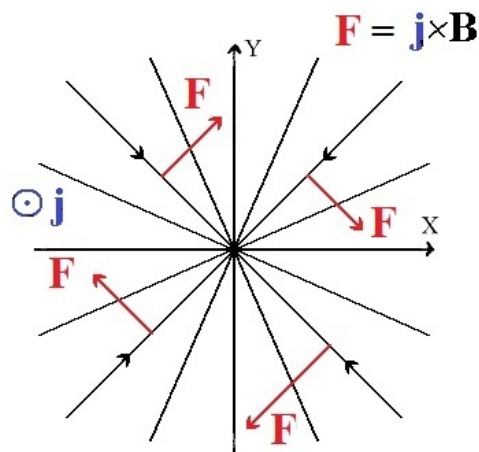
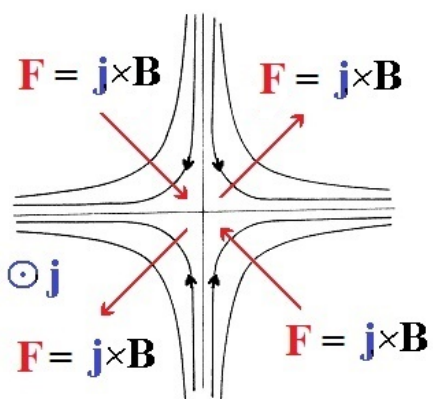
$$y = Cx$$



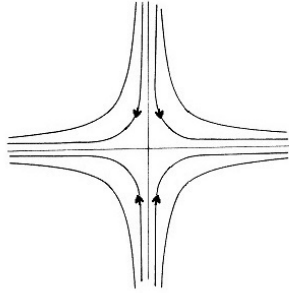
=



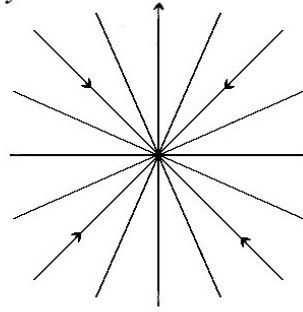
$$y = \underline{Cx}^\alpha, \quad \alpha = \lambda_2/\lambda_1$$



$$y = Cx^{-1}$$

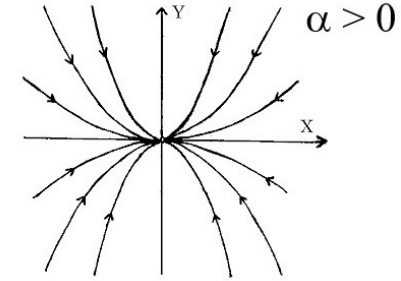
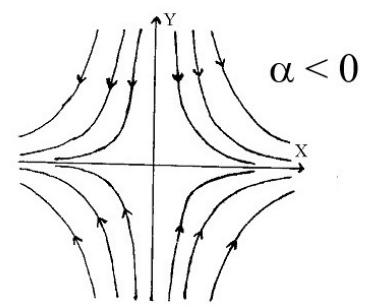


$$y = Cx$$

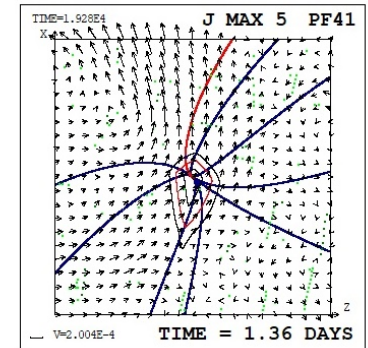
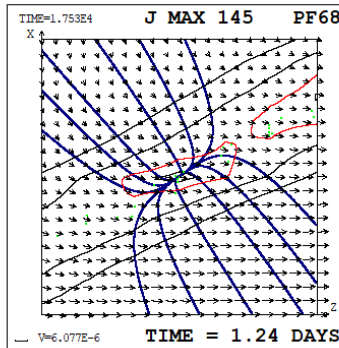
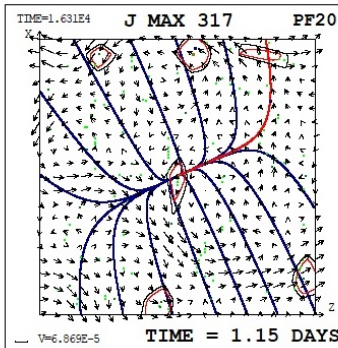
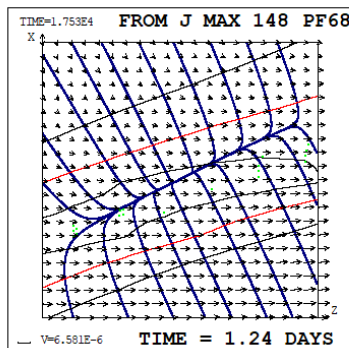
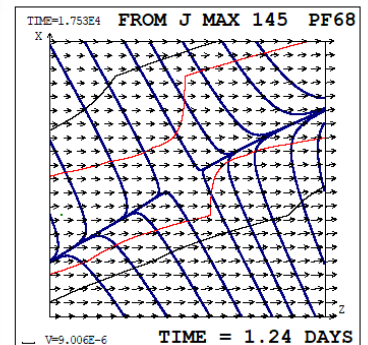
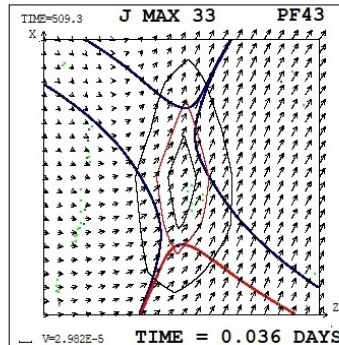
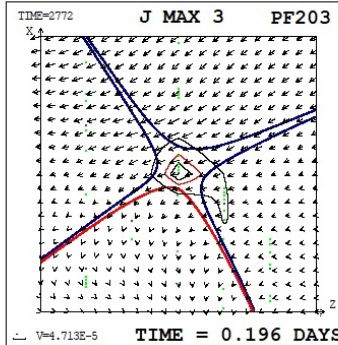
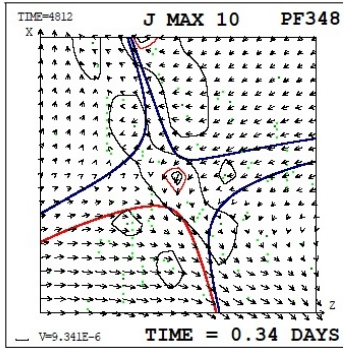


+

=

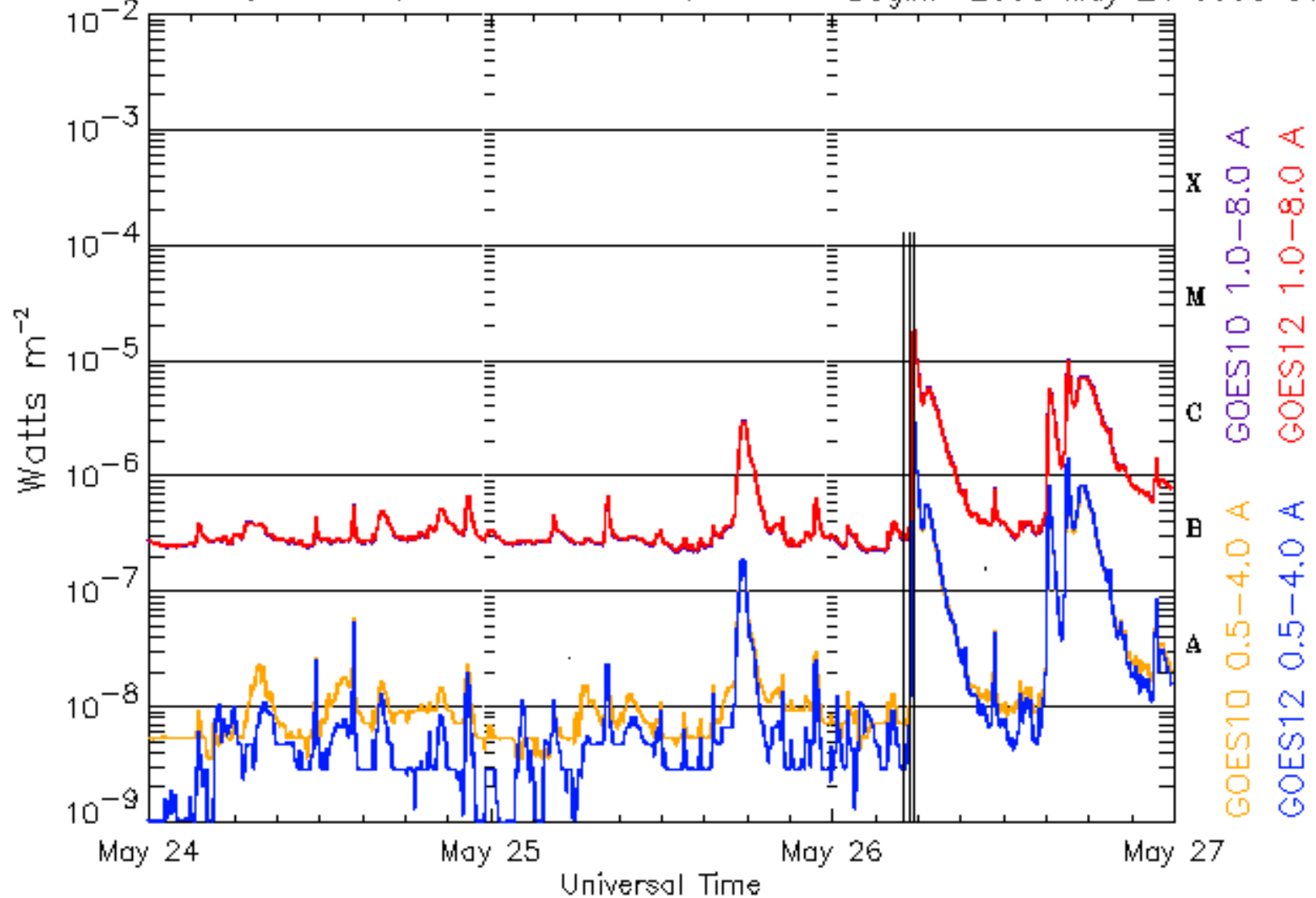


$$y = Cx^\alpha, \quad \alpha = \lambda_2/\lambda_1$$



GOES Xray Flux (5 minute data)

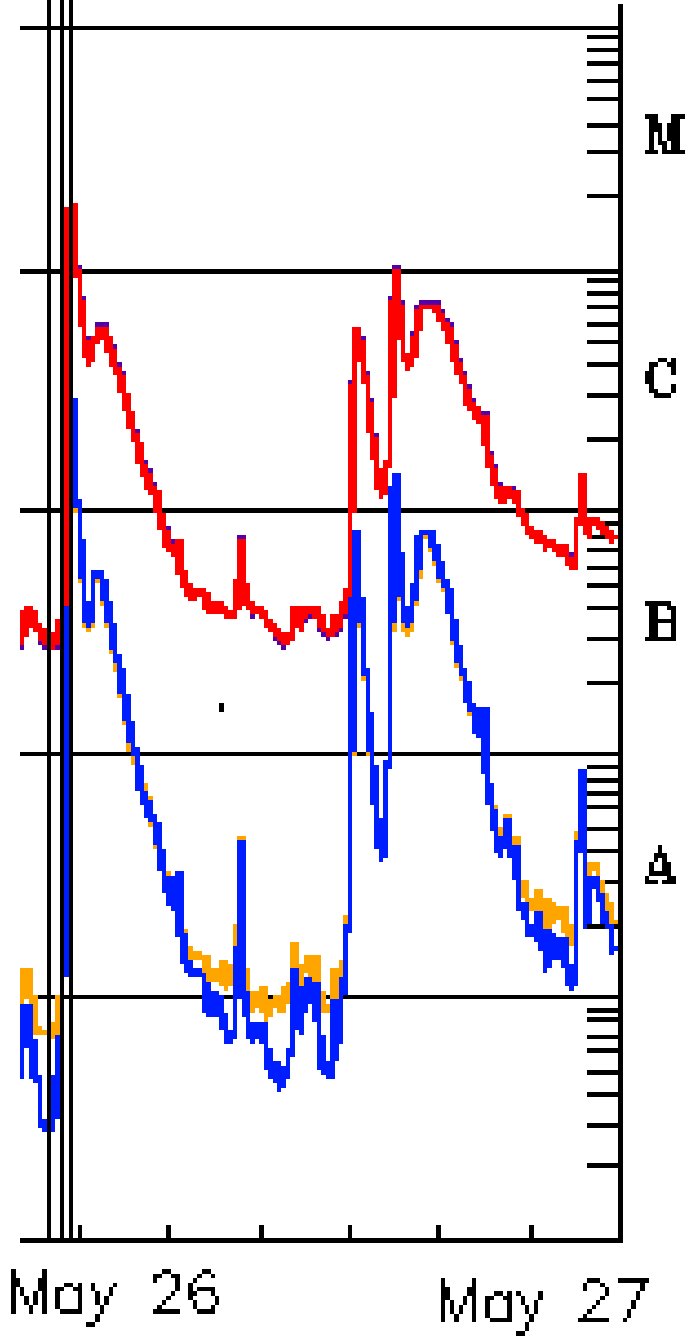
Begin: 2003 May 24 0000 UTC



Updated 2003 May 26 23:56:05 UTC

NOAA/SEC Boulder, CO USA

Вспышка над АО 10365 M1.9 2003/05/26 05:34



Start

2003/05/26 05:34:00

Stop

Peak

06:02:00

05:50:00

GOES Class

Derived Position

M1.9

S07E06

Над АО 10365

Моменты сравнения: 2003/05/26

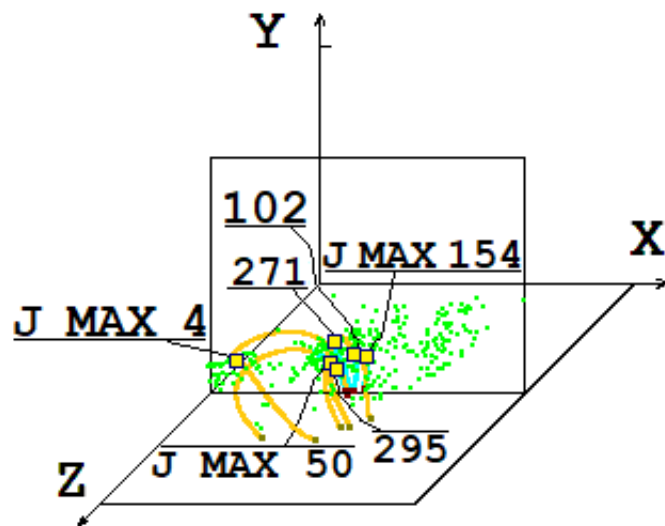
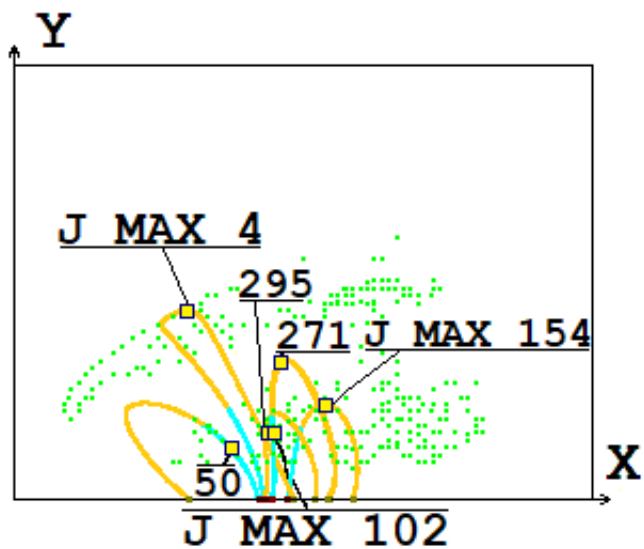
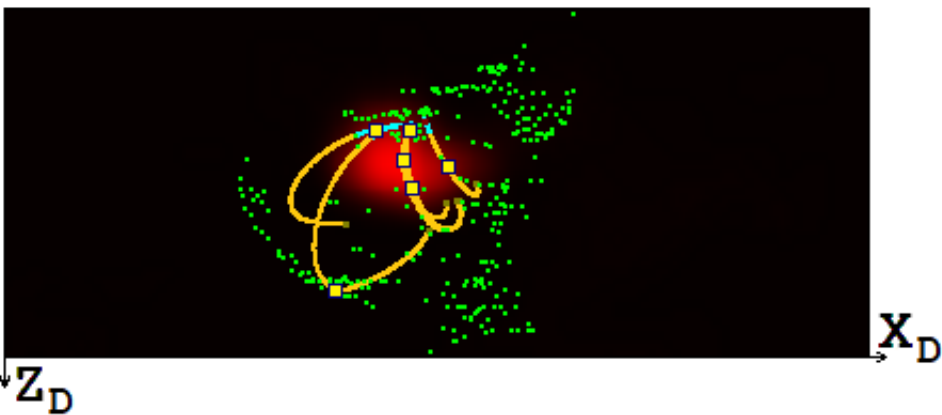
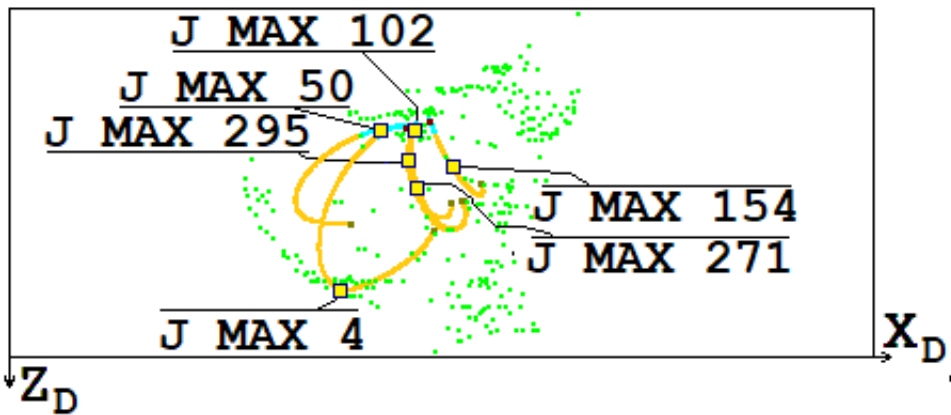
02:32:05

04:47:05

05:50:03

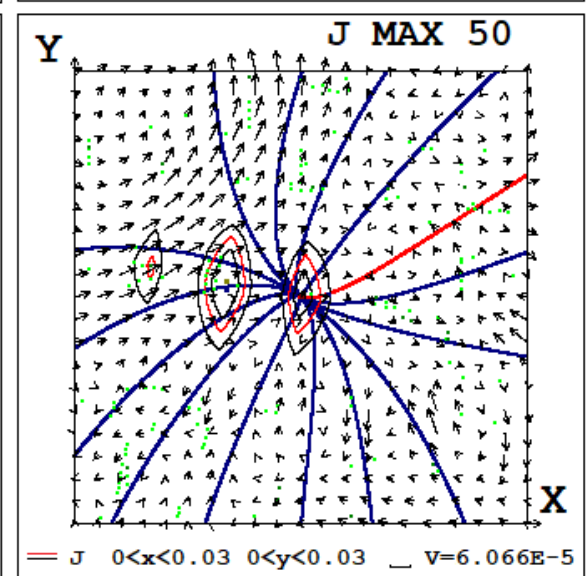
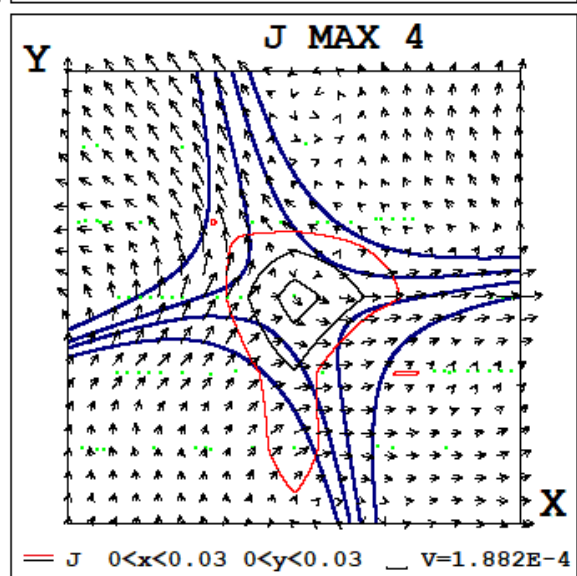
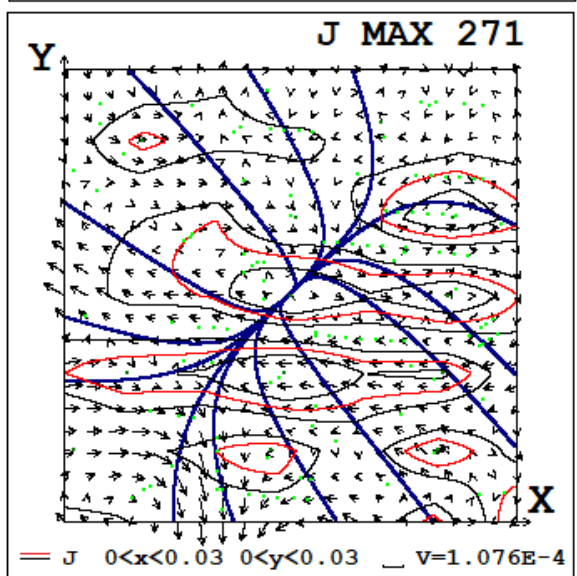
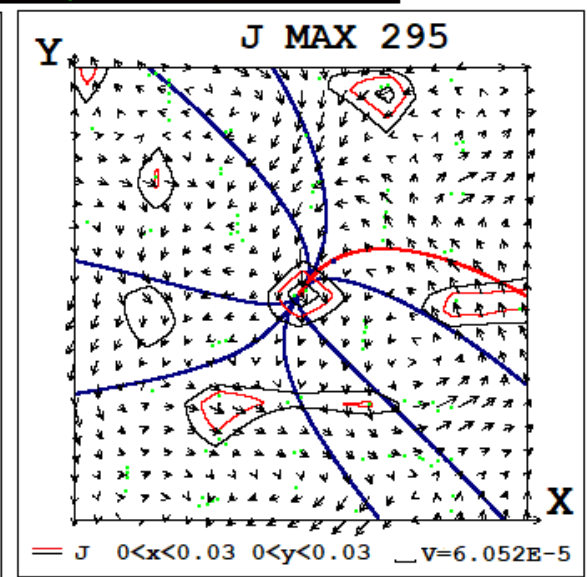
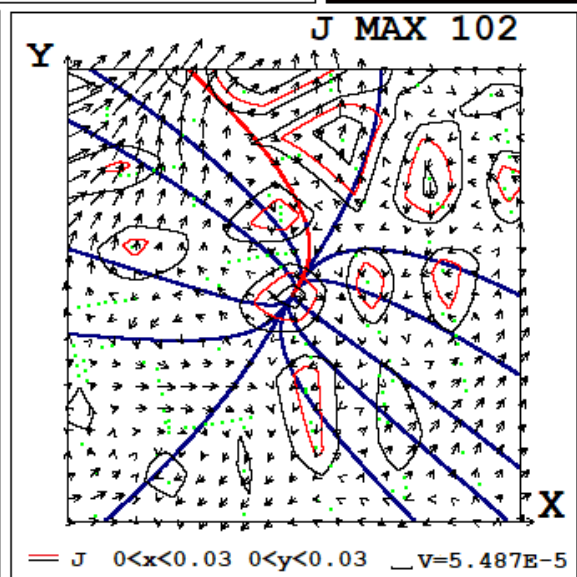
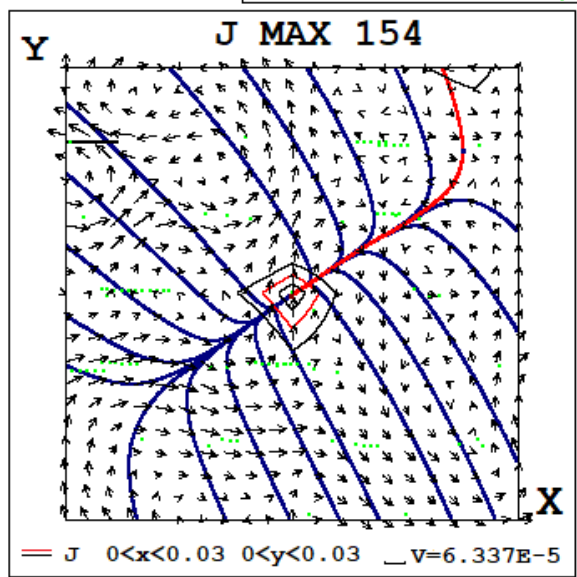
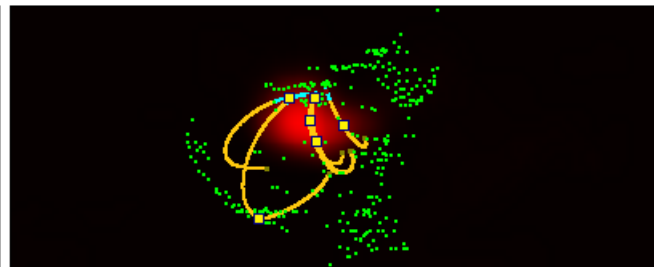
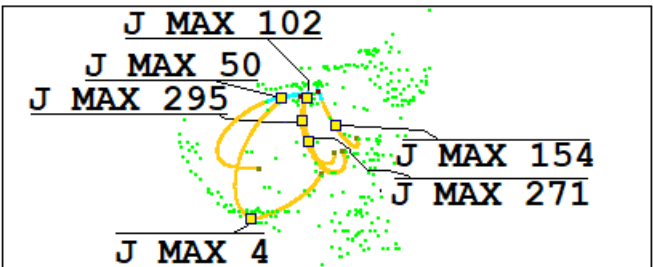
May 26

May 27



AO 10365 2003-05-26 05:50:03 ВСПЫШКА М 1.9

Наложение на распределение радиоизлучения,
 полученного на Радиогелиографе Нобеяма
 (NoRH).



АО 10365 2003-05-26 02:32:05 ЗА ТРИ ЧАСА ПЕРЕД ВСПЫШКОЙ М 1.9

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \text{rot}(\mathbf{V} \times \mathbf{B}) - \frac{1}{\text{Re}_m} \text{rot} \left(\frac{\sigma_0}{\sigma} \text{rot} \mathbf{B} \right) - \text{rot}(v_{m_Art} \text{rot} \mathbf{B}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\text{div}(\mathbf{V} \rho) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} = -(\mathbf{V}, \nabla) \mathbf{V} - \frac{\beta_0}{2\rho} \nabla(\rho T) - \frac{1}{\rho} (\mathbf{B} \times \text{rot} \mathbf{B}) + \frac{1}{\text{Re}_\rho} \Delta \mathbf{V} + G_g \mathbf{G} + v_{Art} \Delta \mathbf{V} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} = & -(\mathbf{V}, \nabla) T - (\gamma - 1) T \text{div} \mathbf{V} + (\gamma - 1) \frac{2\sigma_0}{\text{Re}_m \sigma \beta_0 \rho} (\text{rot} \mathbf{B})^2 - (\gamma - 1) G_q \rho L'(T) + \\ & + \frac{\gamma - 1}{\rho} \text{div} \left(\mathbf{e}_{\parallel} \kappa_{dl}(\mathbf{e}_{\parallel}, \nabla T) + \mathbf{e}_{\perp 1} \kappa_{\perp dl}(\mathbf{e}_{\perp 1}, \nabla T) + \mathbf{e}_{\perp 2} \kappa_{\perp dl}(\mathbf{e}_{\perp 2}, \nabla T) \right) \end{aligned} \quad (4)$$

2 варианта расчетов:

- 1) $\text{Re}_m = 3 \times 10^4$; $\text{Re} = 10^4$
- 2) $\text{Re}_m = 10^9$; $\text{Re} = 10^7$.

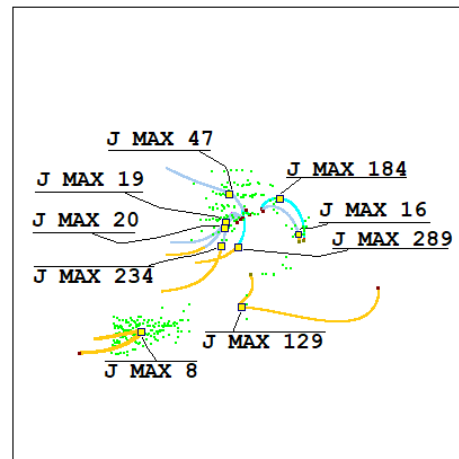
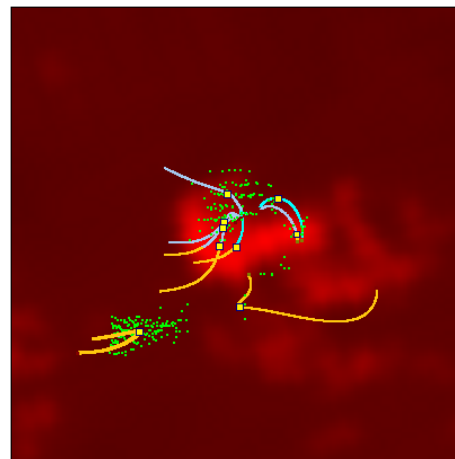
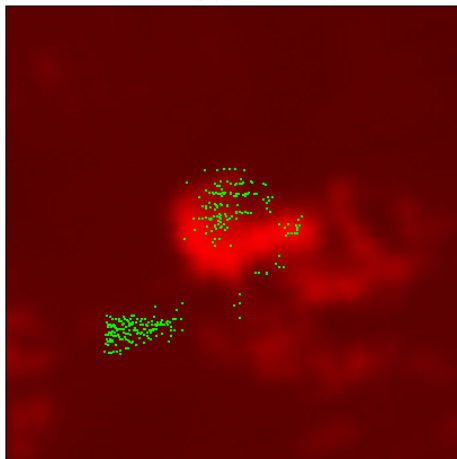
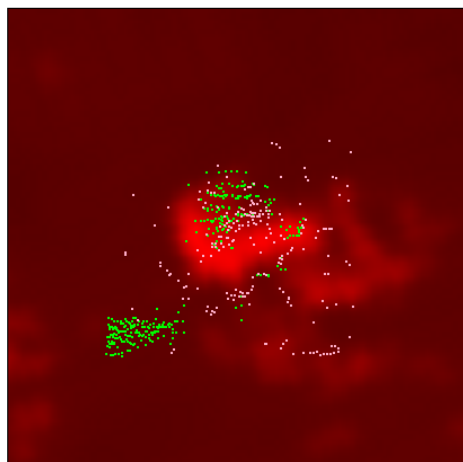
Для того, чтобы лучше понять из результатов численного МГД моделирования, что происходит в солнечной короне над АО 10365 26 мая 2003 г. в момент 02:32:05 за три часа перед вспышкой М 1.9, сравниваются результаты первого варианта расчетов с большими вязкостями ($\text{Re}_m = 3 \times 10^4$, $\text{Re} = 10^4$), и второго варианта, выполненного для относительно малых вязкостей ($\text{Re}_m = 10^9$, $\text{Re} = 10^7$).

Реальные величины магнитного и обычного чисел Рейнольдса в солнечной короне составляют $Re_m = L_0 V_0 / \nu_m = 2 \times 10^{16}$, $Re = 10^4$ ($\nu_m = c^2 / 4\pi\sigma$). Проведены два варианта расчета для сравнительно больших магнитной и обычной вязкостей ($Re_m = 3 \times 10^4$, $Re = 10^4$) и для относительно малых вязкостей ($Re_m = 10^9$, $Re = 10^7$). В первом варианте практически не возникали численные неустойчивости, поскольку они эффективно стабилизировались при больших вязкостях. При малых вязкостях не происходит подавление возмущения, распространяющегося от солнечной поверхности, так что в солнечной короне может накопиться магнитная энергия для солнечной вспышки. Представление о поведении решения и процессах вблизи особых линий магнитного поля в реальной ситуации складывается в результате сравнения решений, полученных для этих двух наборов вязкостей.

$Rm=10^9; Re=10^7 - PF29$

$Rm=10^9; Re=10^7$

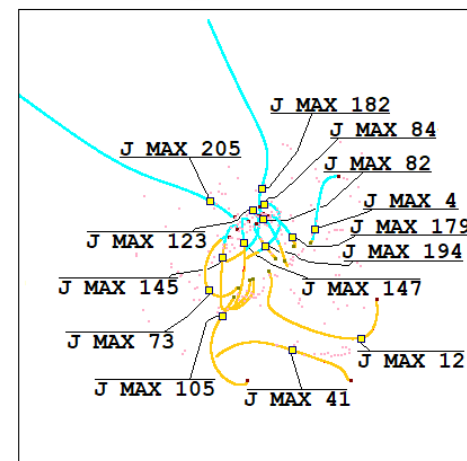
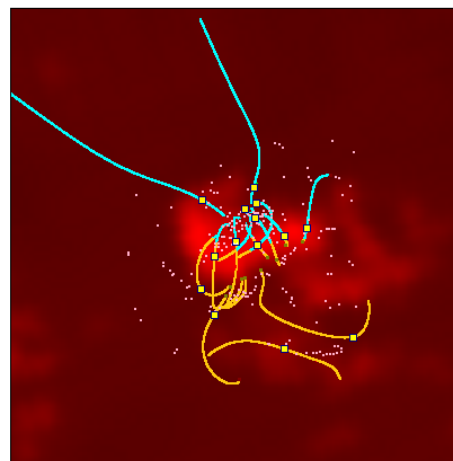
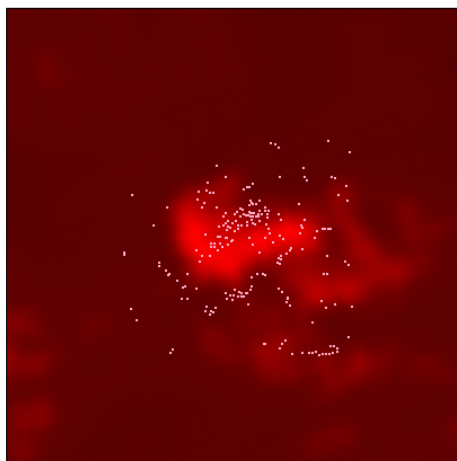
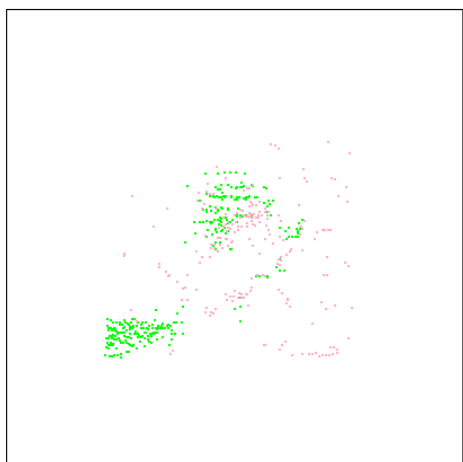
$Rm=10^9; Re=10^7$



$Rm=3 \times 10^4; Re=10^4 - PF68$

$Rm=3 \times 10^4; Re=10^4$

$Rm=3 \times 10^4; Re=10^4$

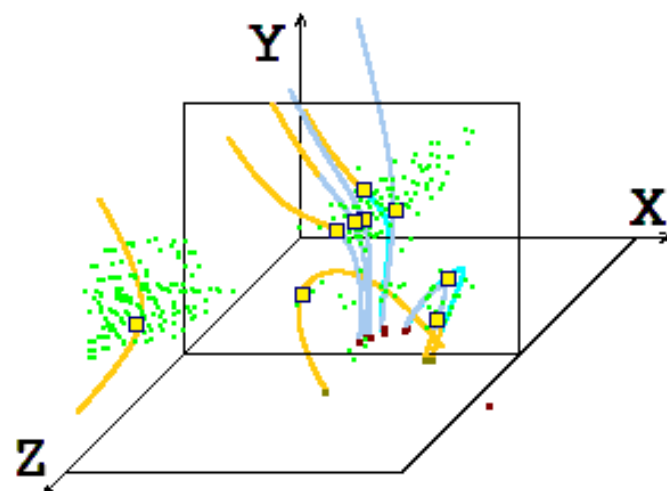
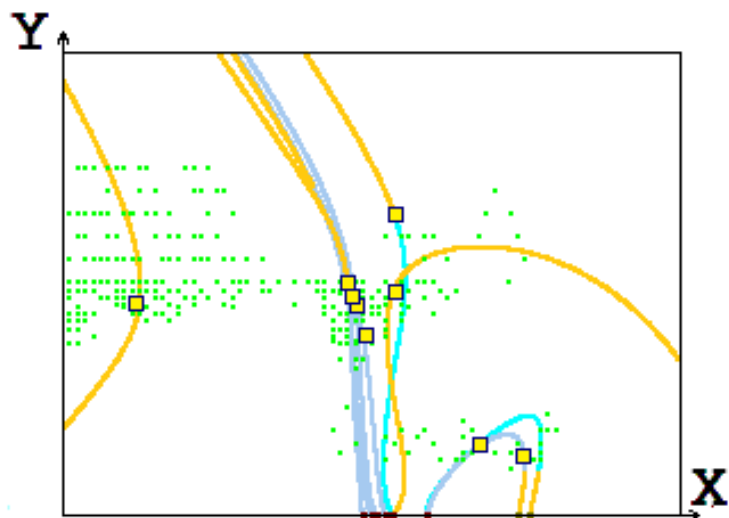
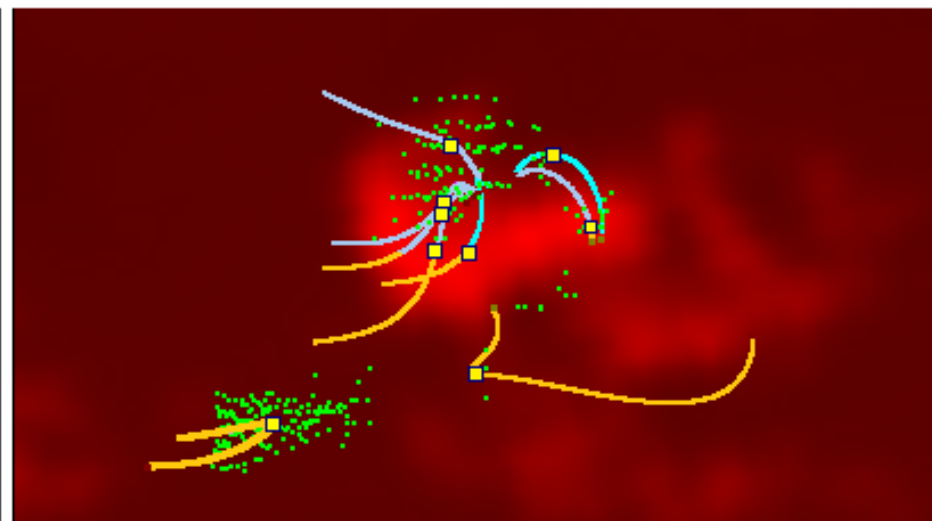
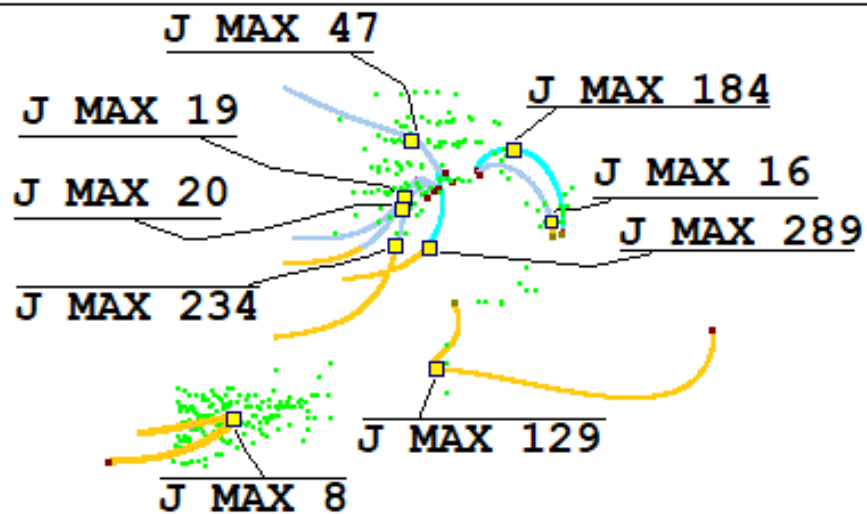


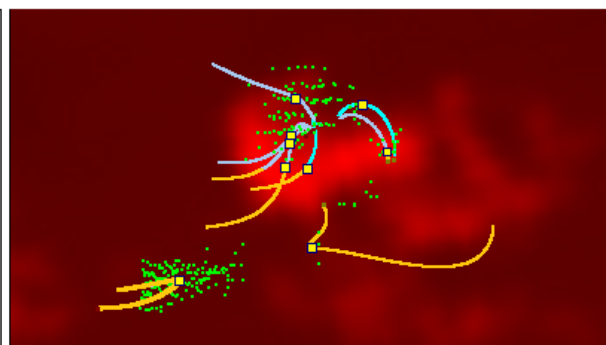
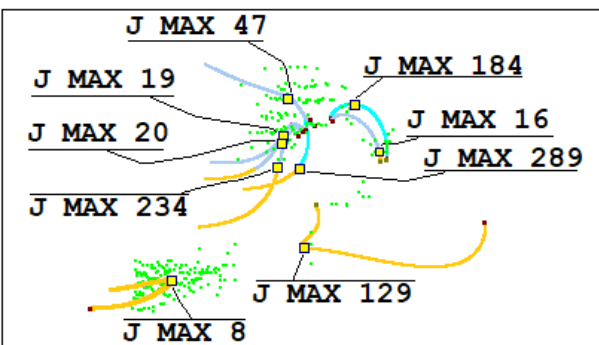
PF29 - PF68

**АО 10365 2003-05-26 02:32:05 ЗА ТРИ ЧАСА
 ПЕРЕД ВСПЫШКОЙ М 1.9**

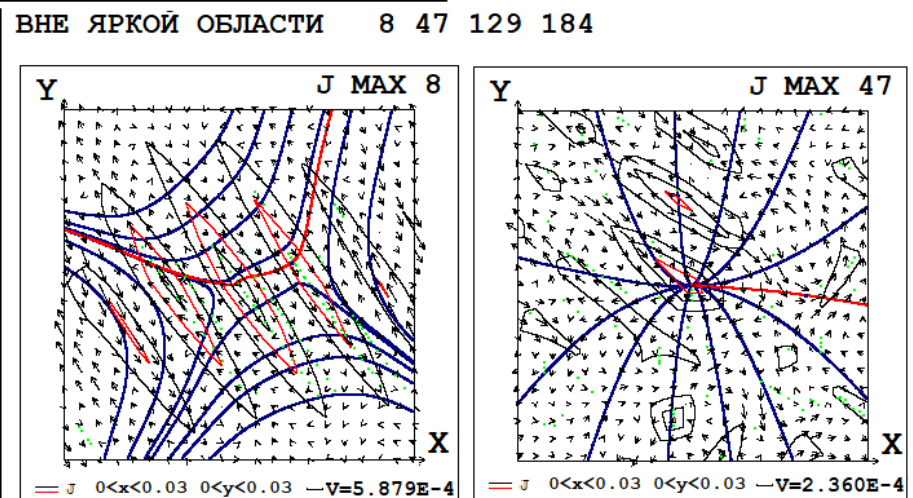
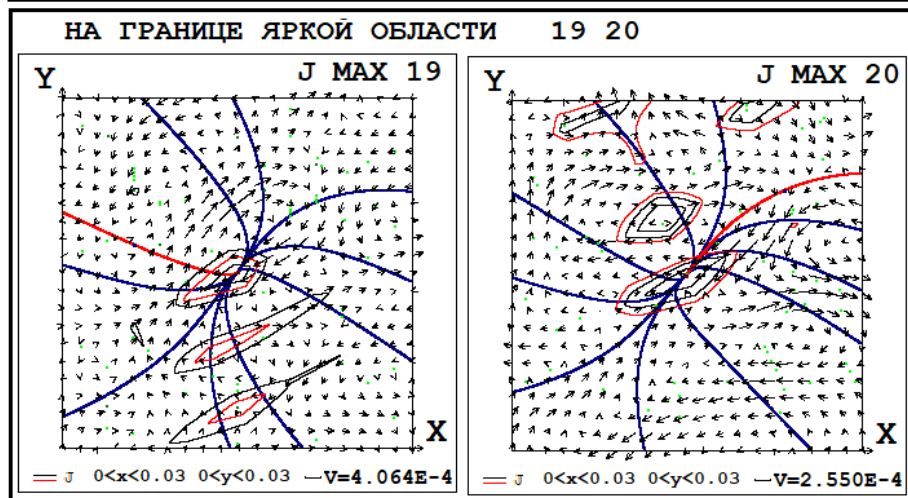
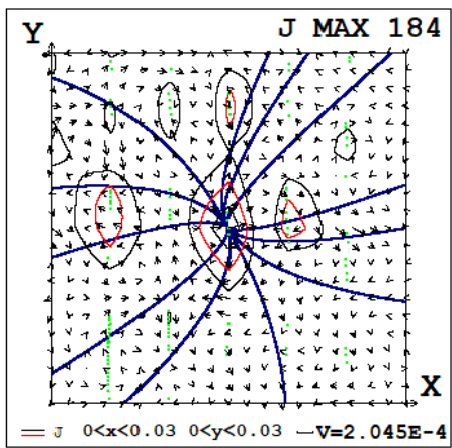
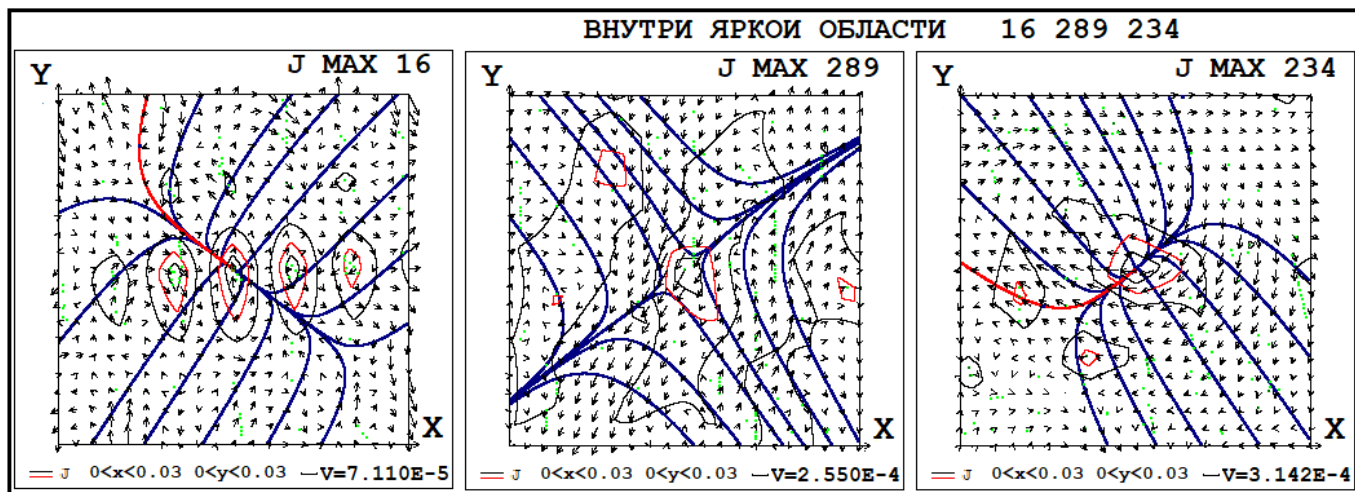
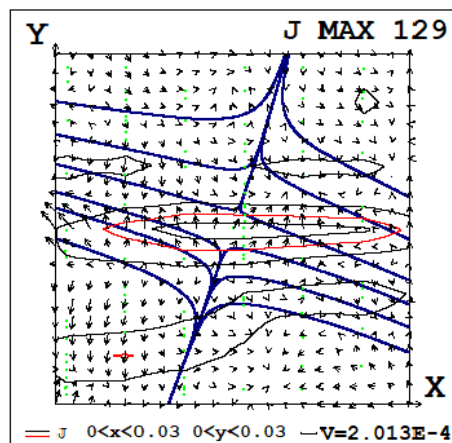
$Rm=10^9; Re=10^7 - PF29$

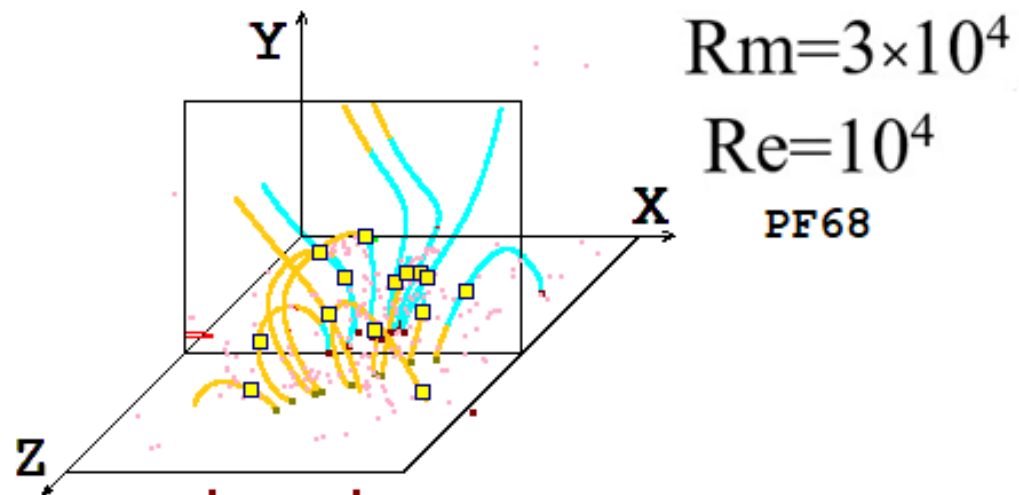
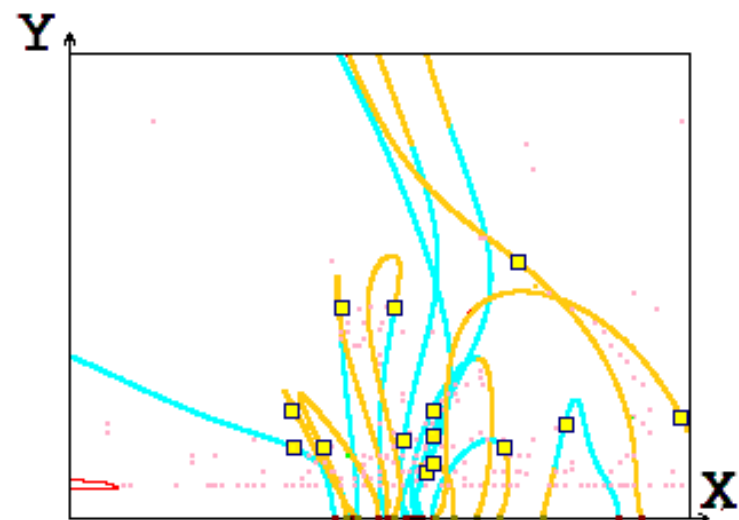
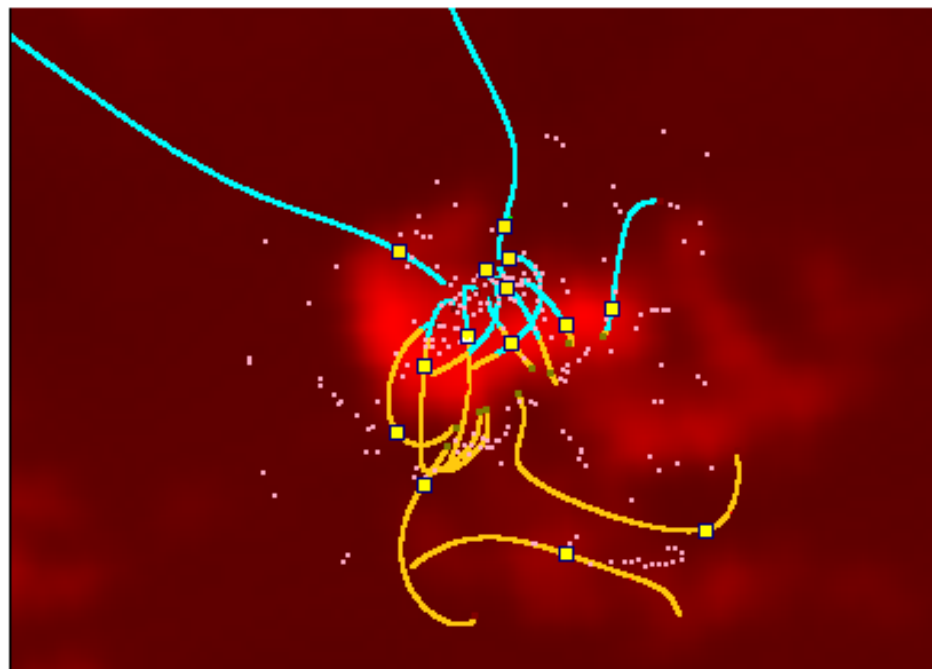
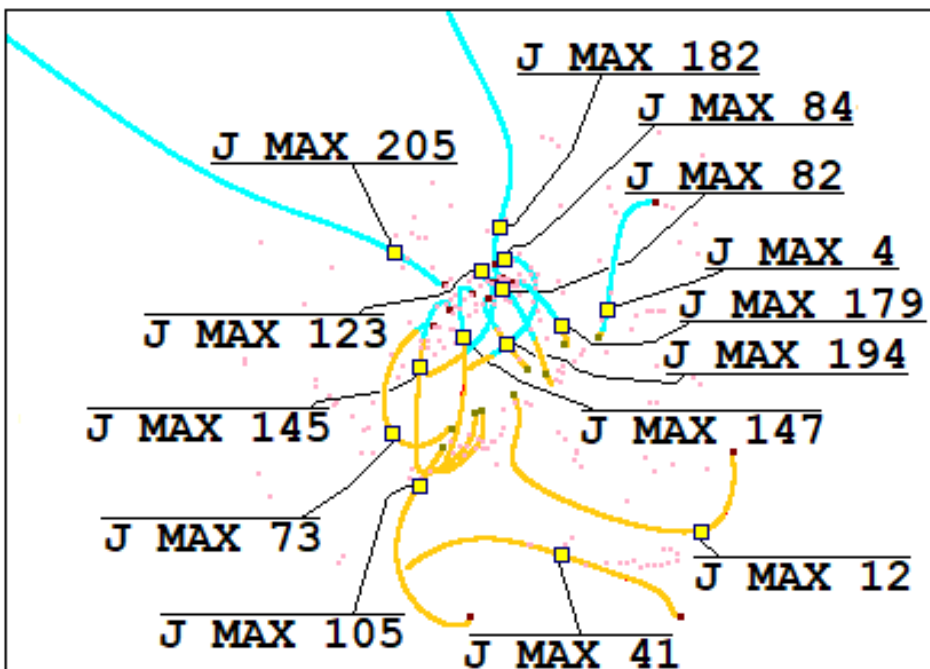
$Rm=10^9; Re=10^7$

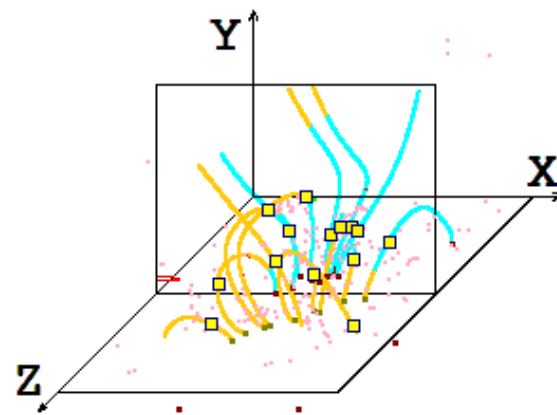
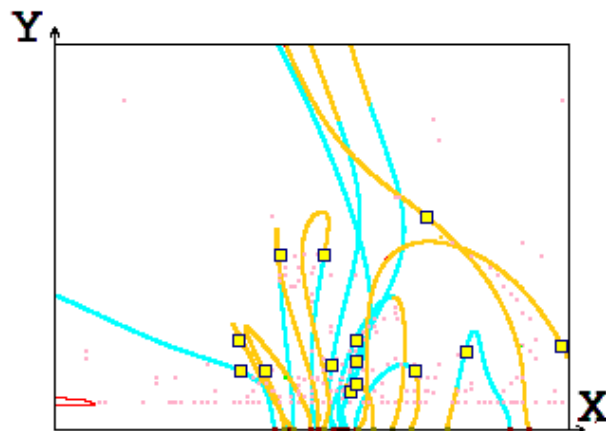
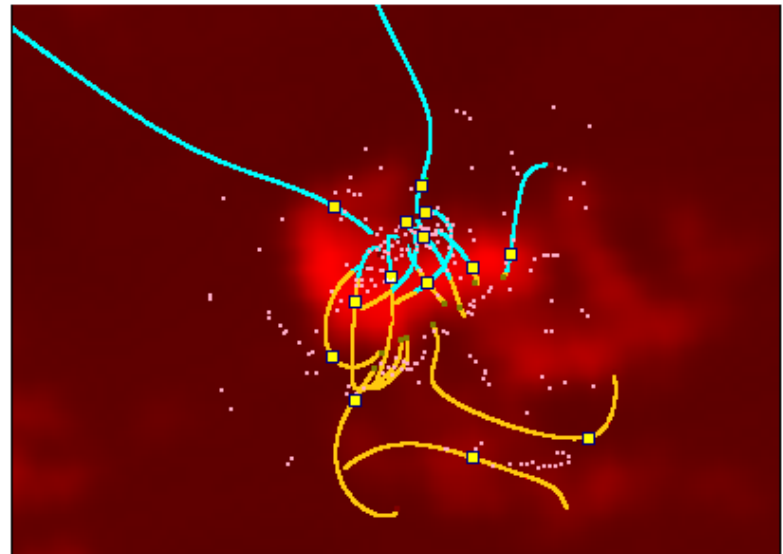
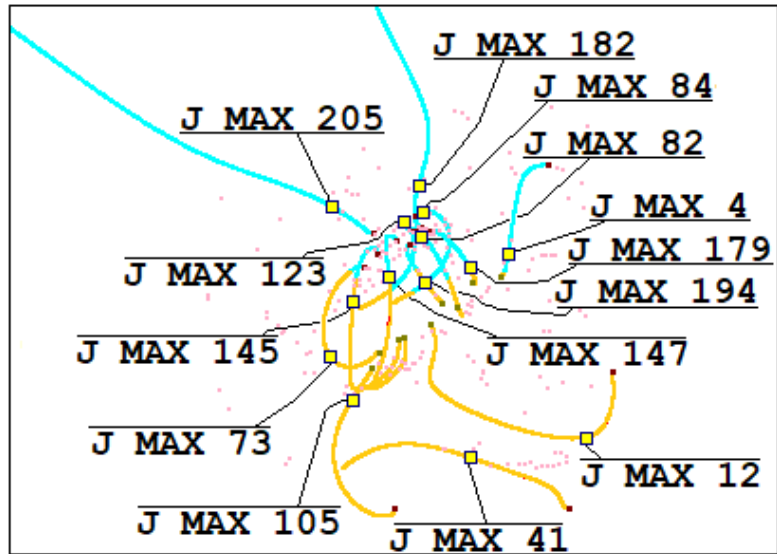




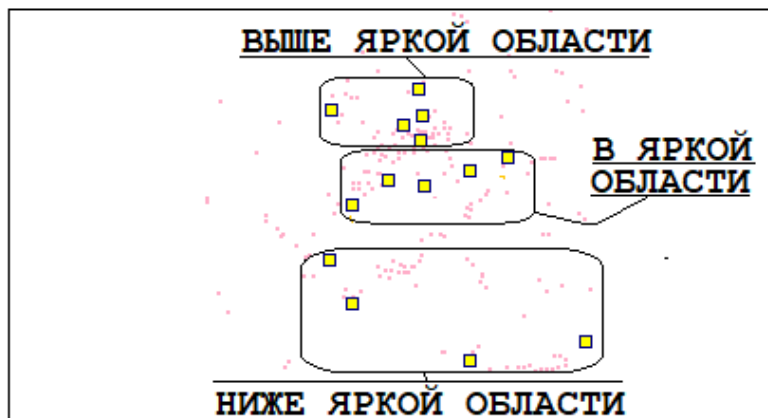
$Rm=10^9$
 $Re=10^7$



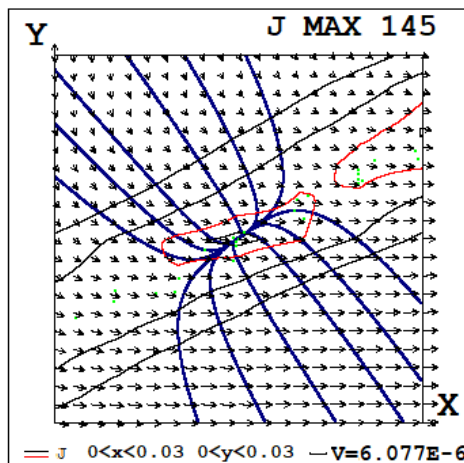
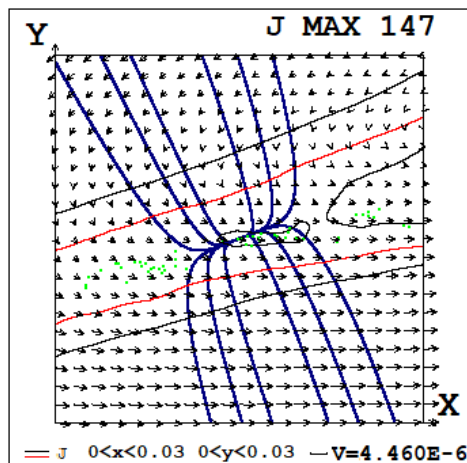
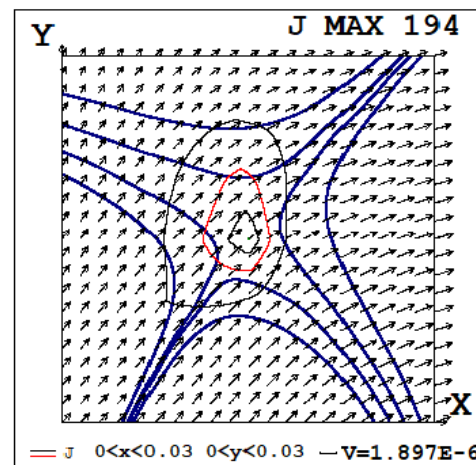
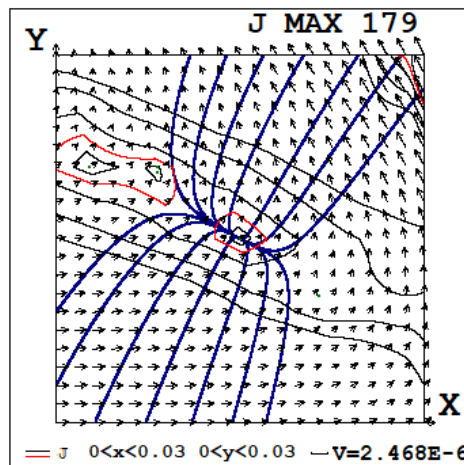
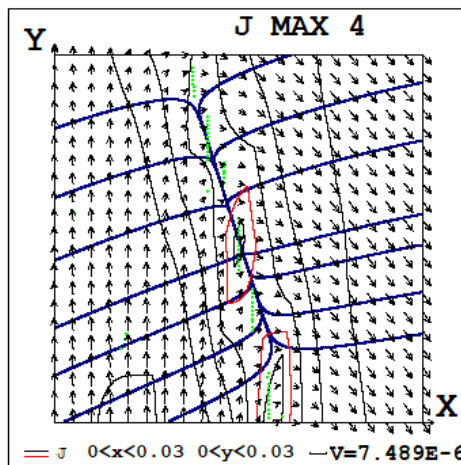
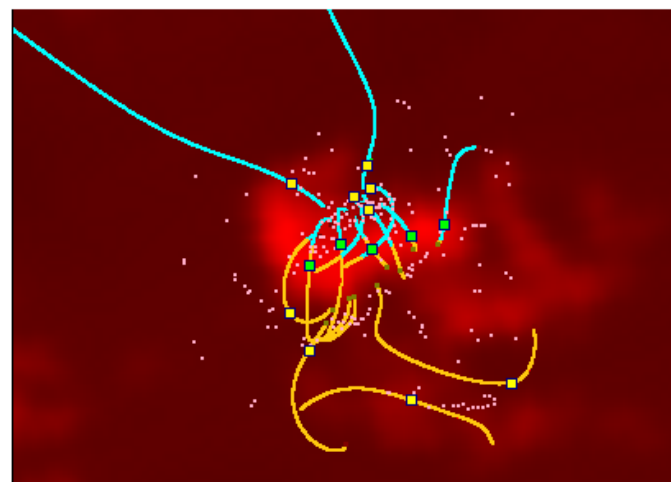
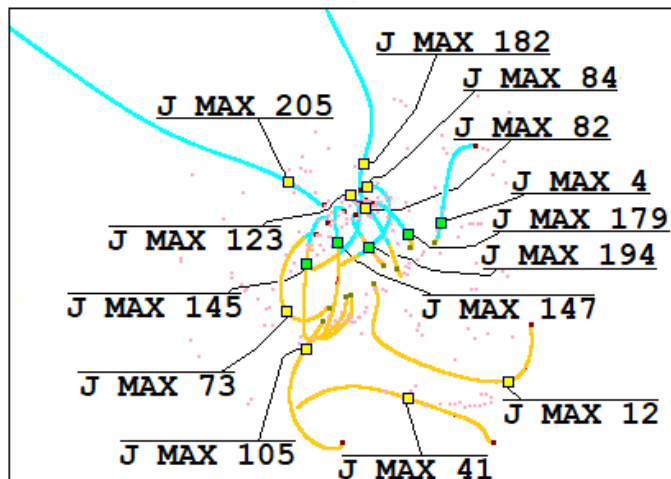




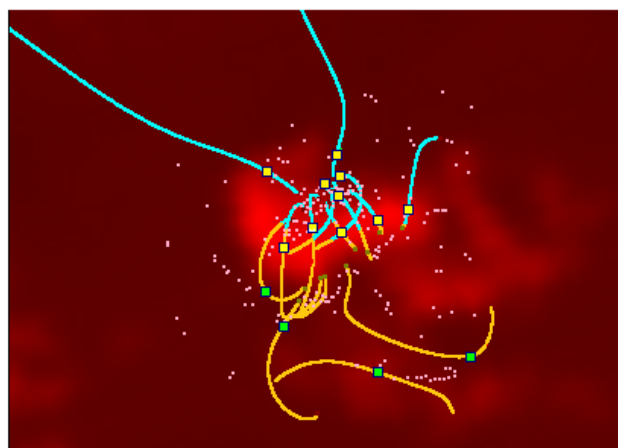
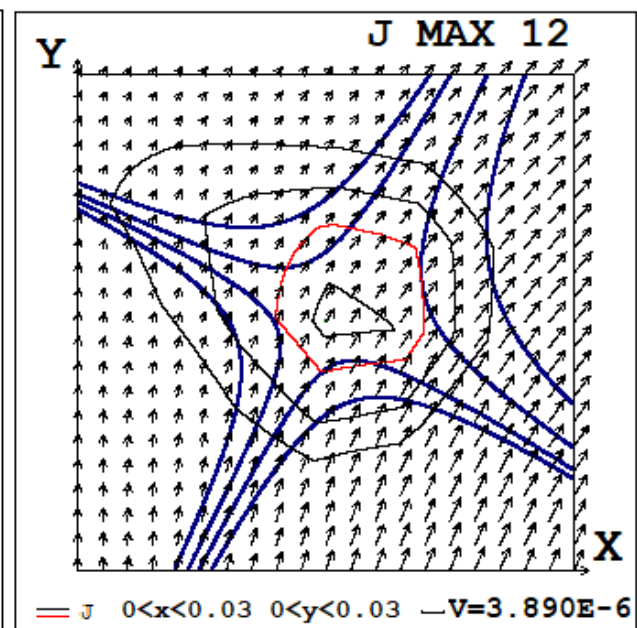
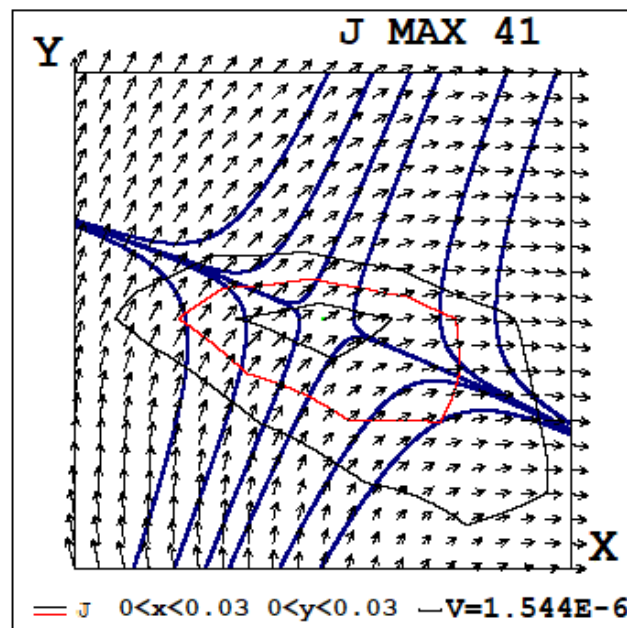
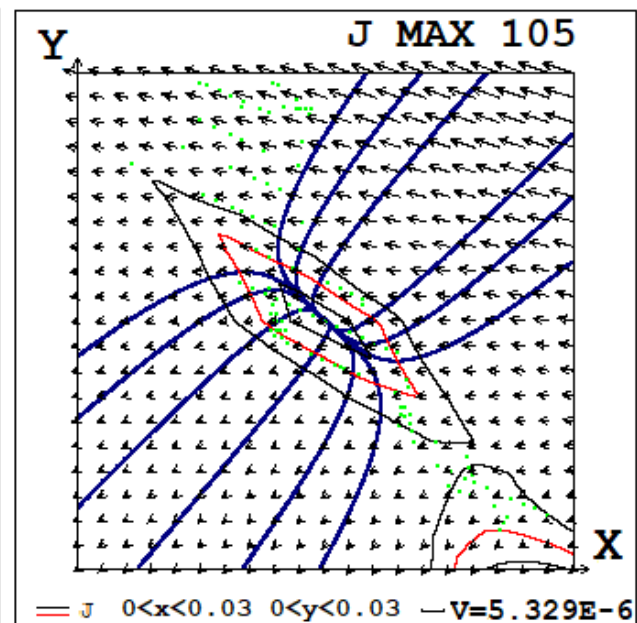
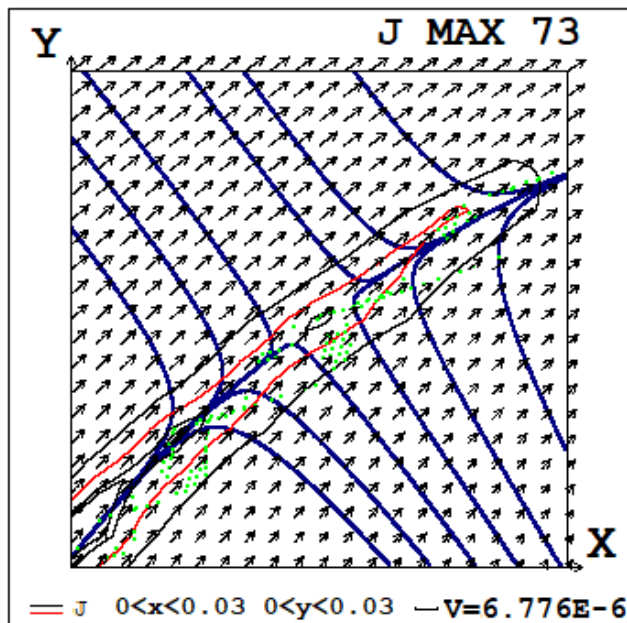
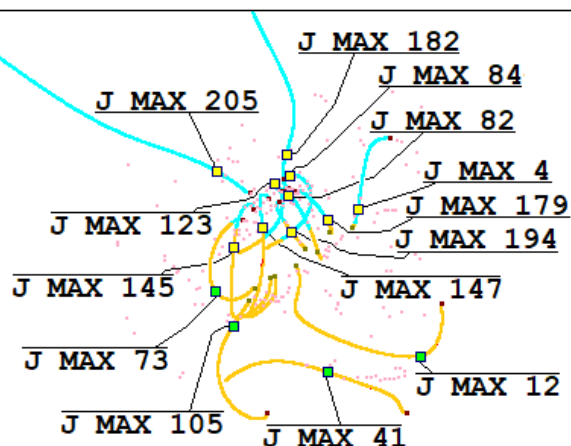
$Rm = 3 \times 10^4$
 $Re = 10^4$
 PF68



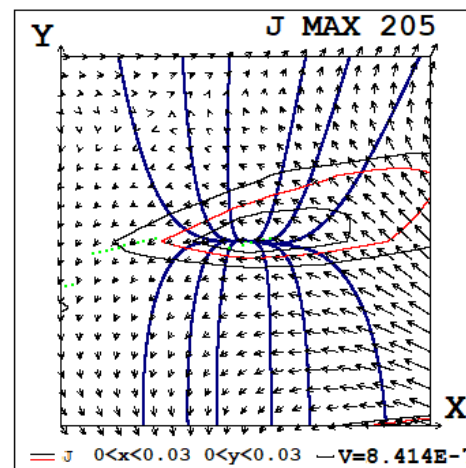
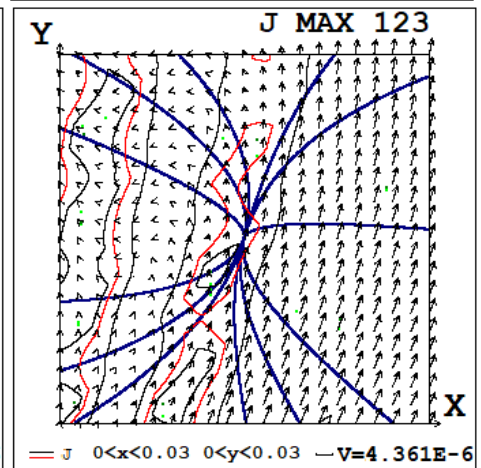
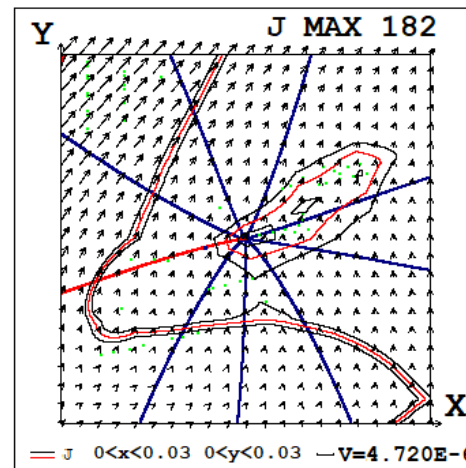
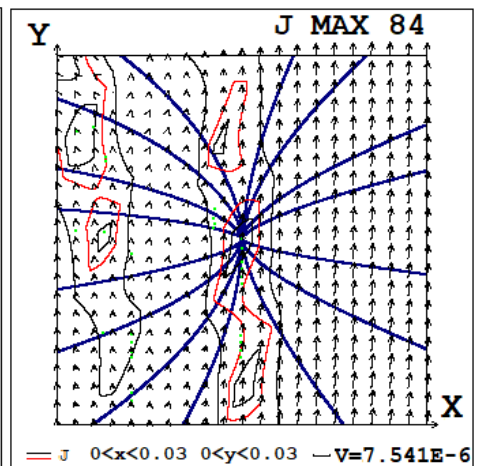
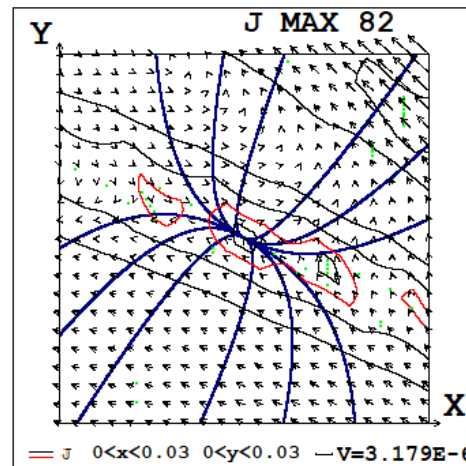
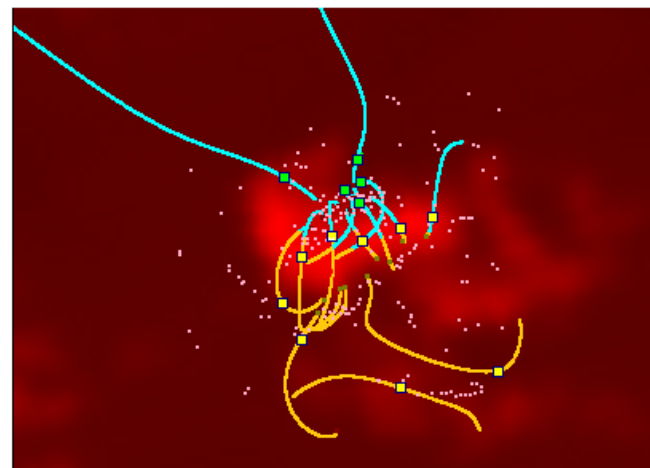
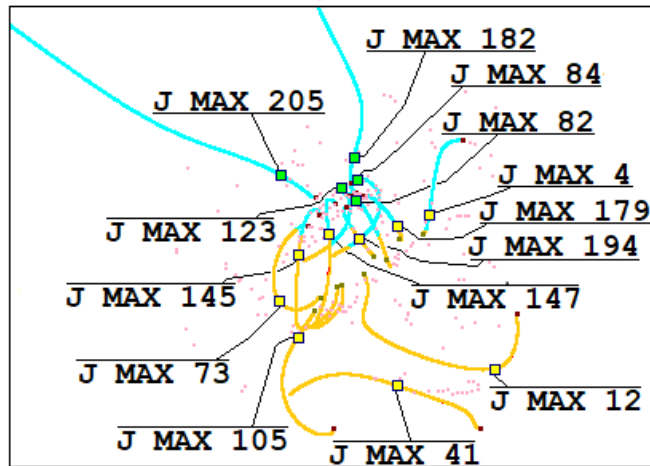
$Rm=3 \times 10^4$ $Re=10^4$



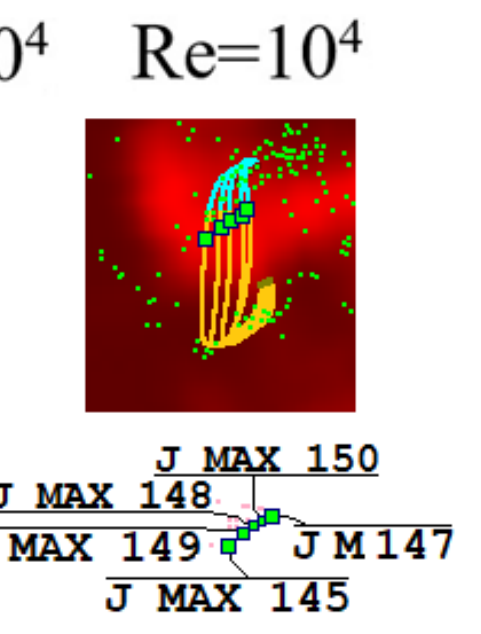
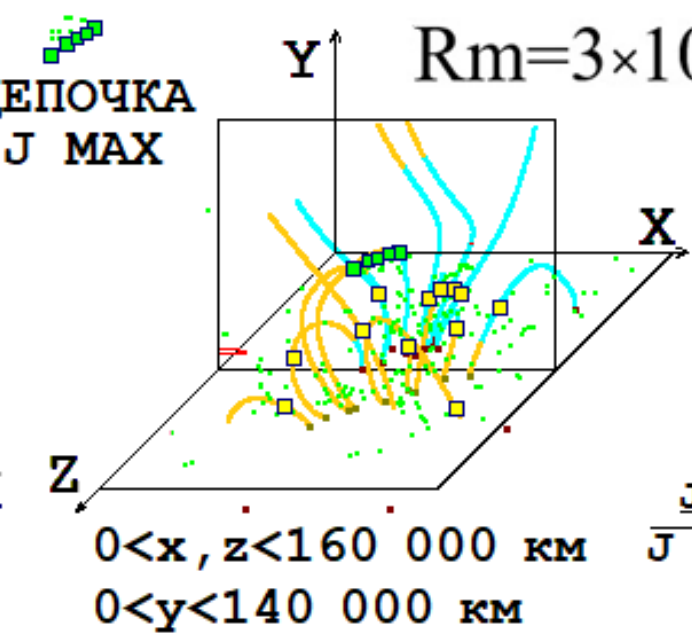
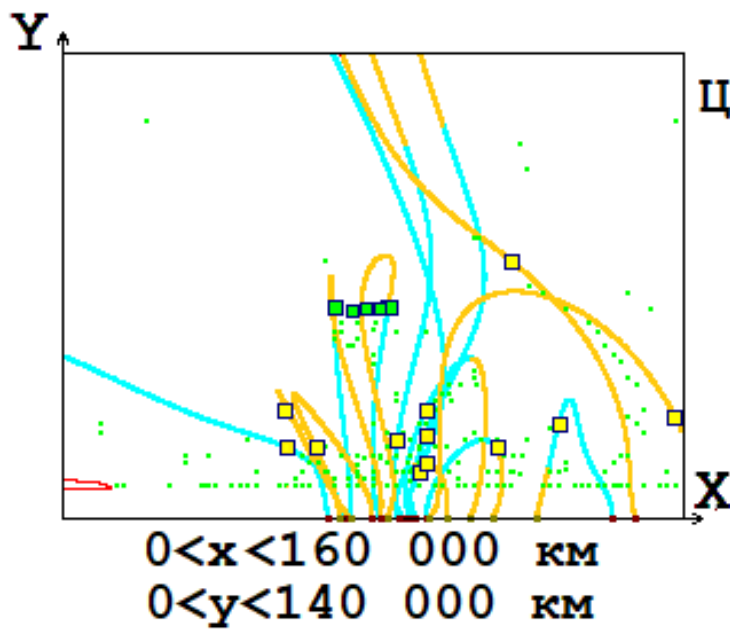
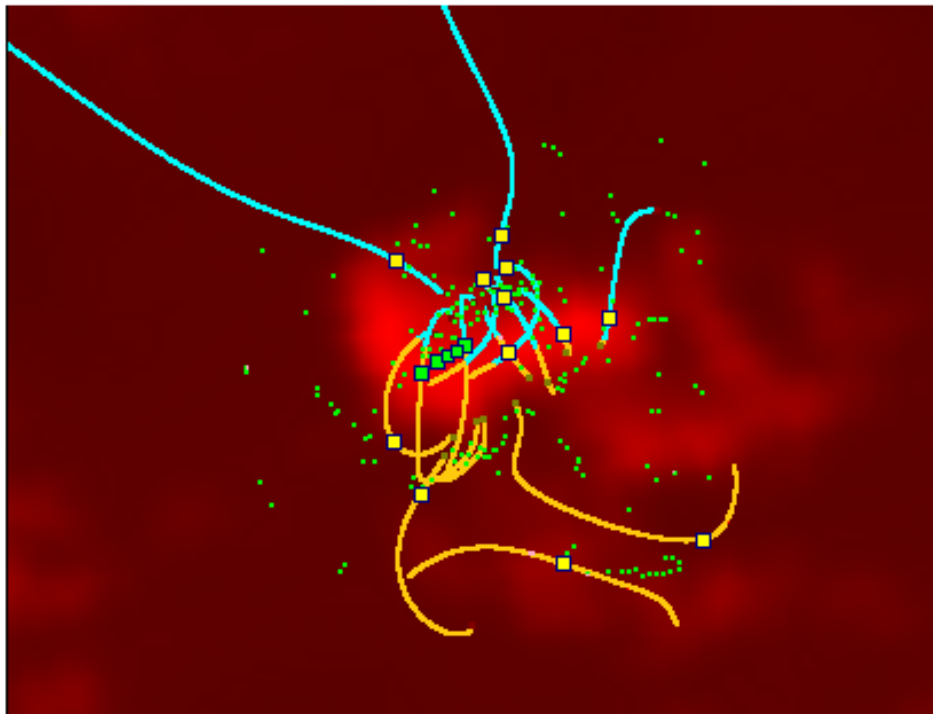
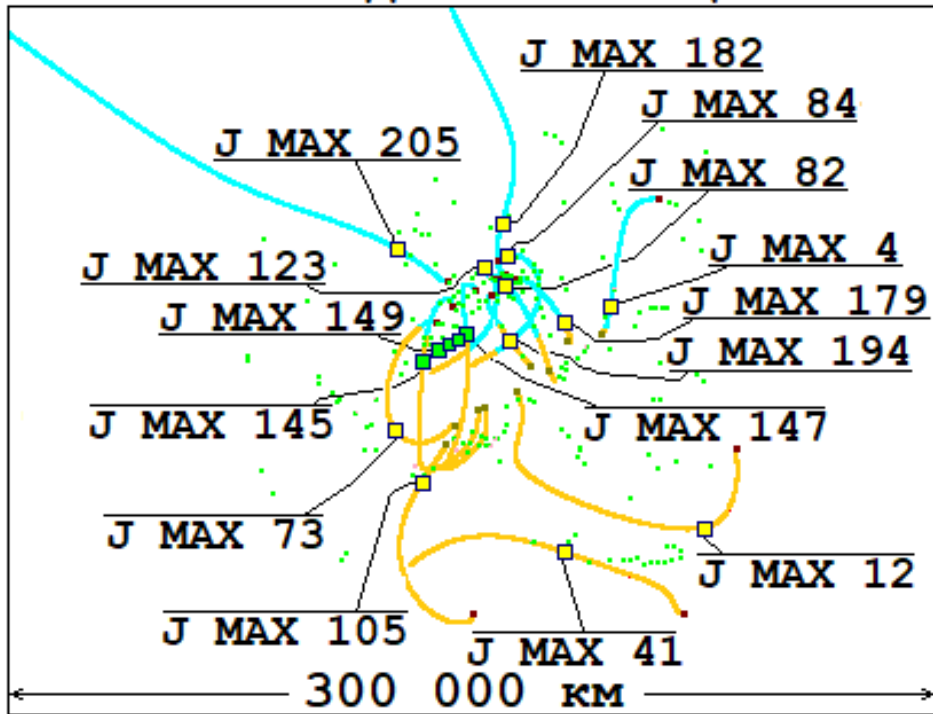
$Rm=3 \times 10^4$ $Re=10^4$

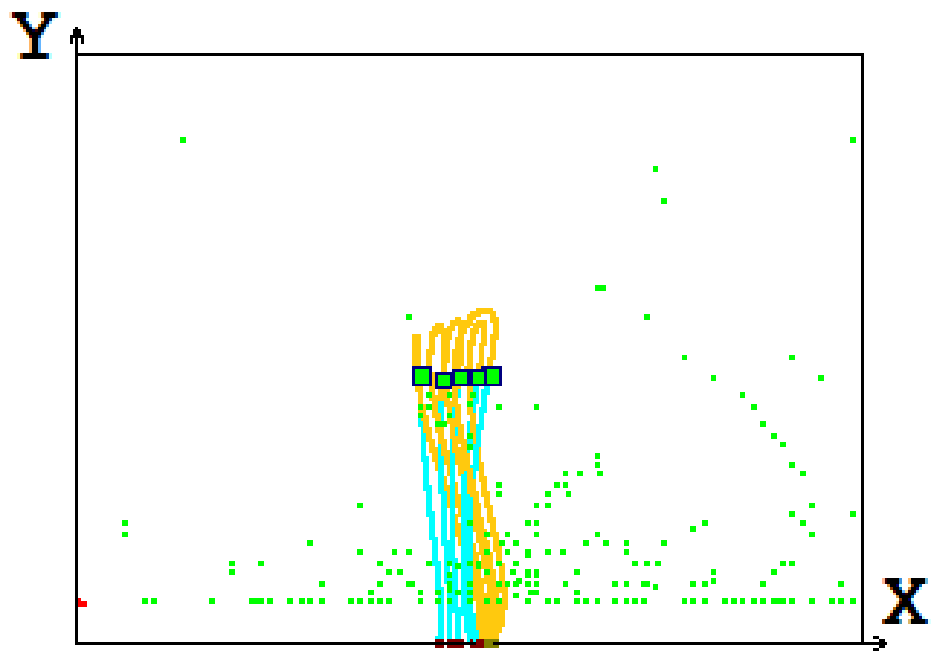
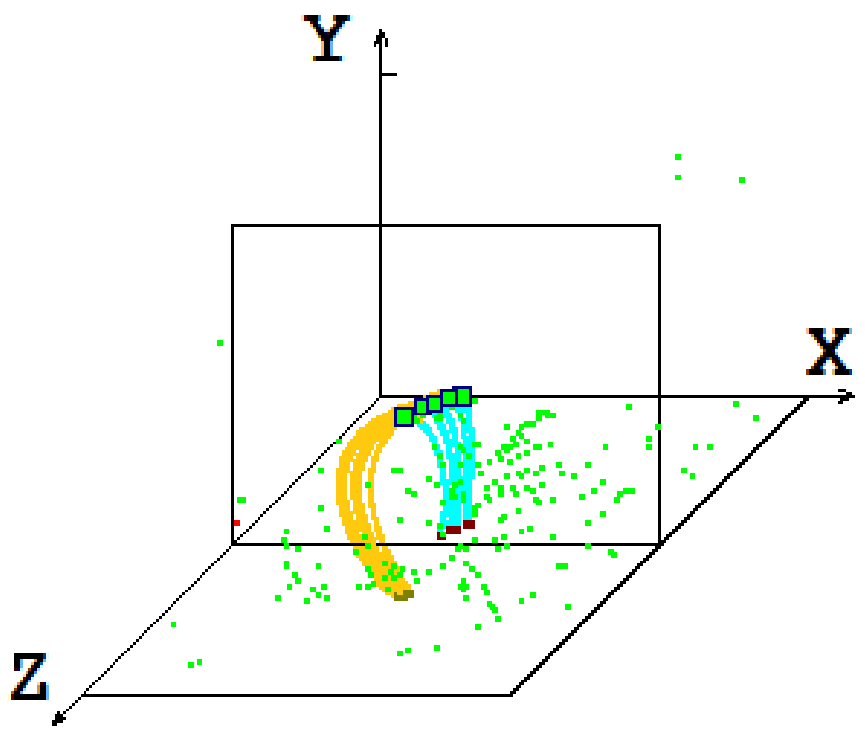
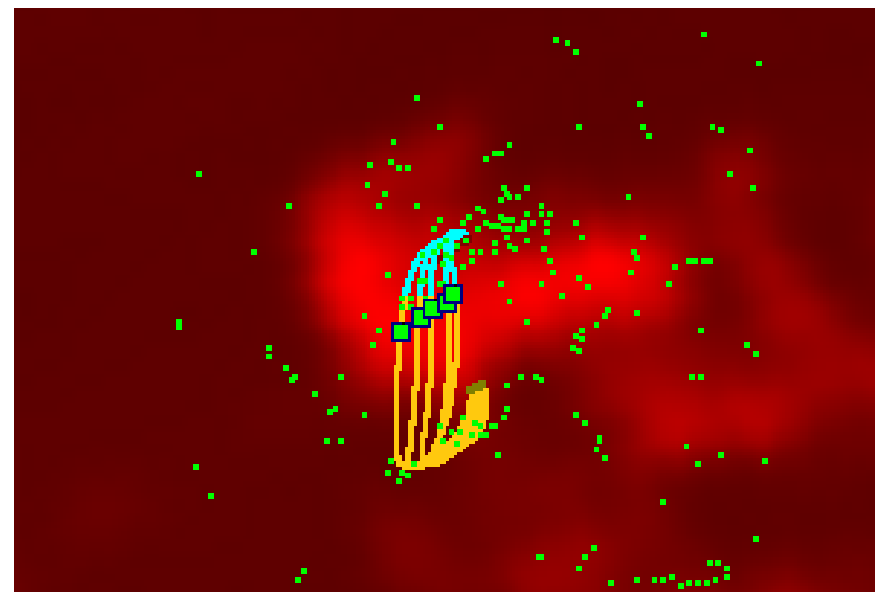
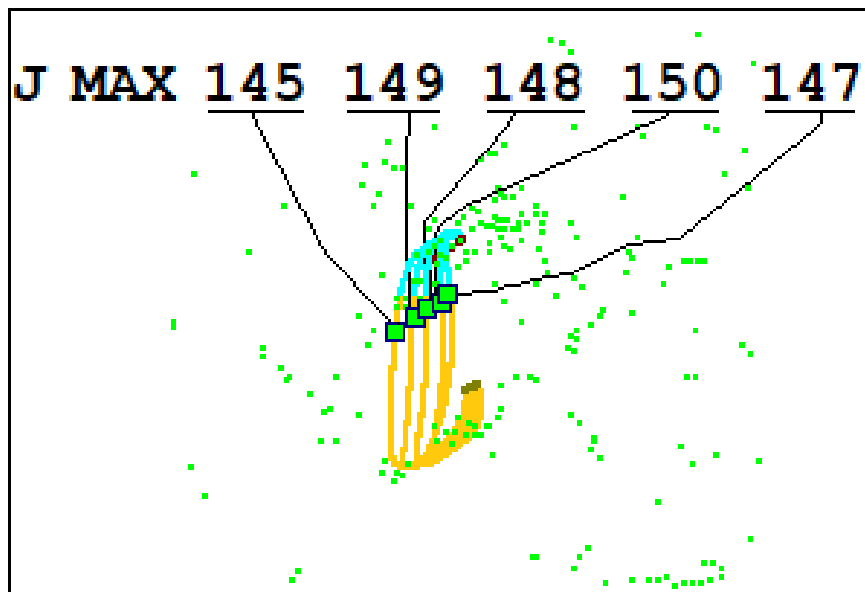


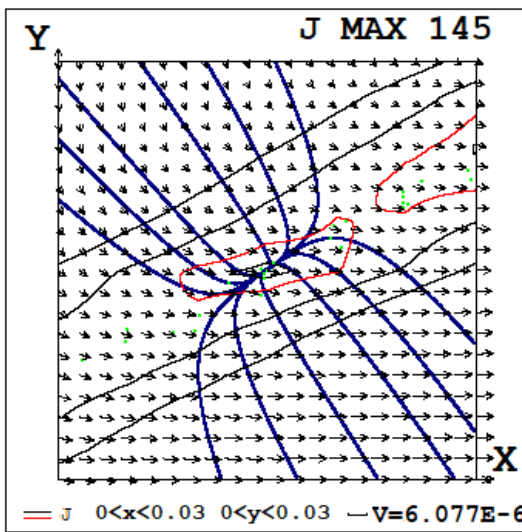
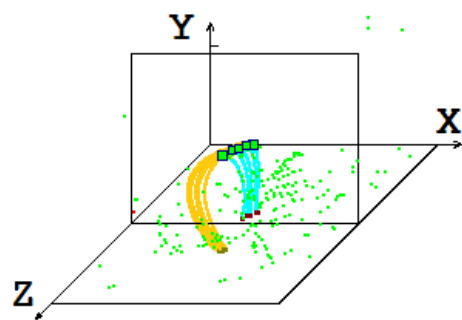
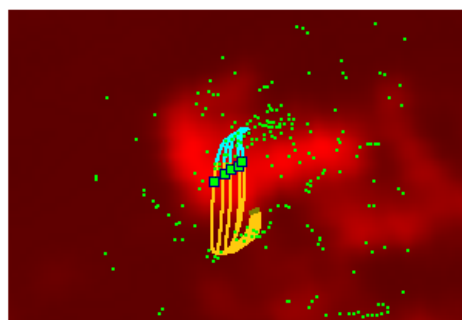
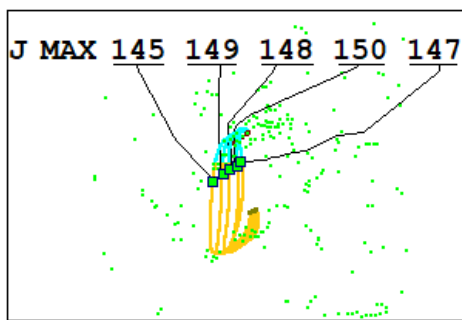
$Rm=3 \times 10^4$ $Re=10^4$



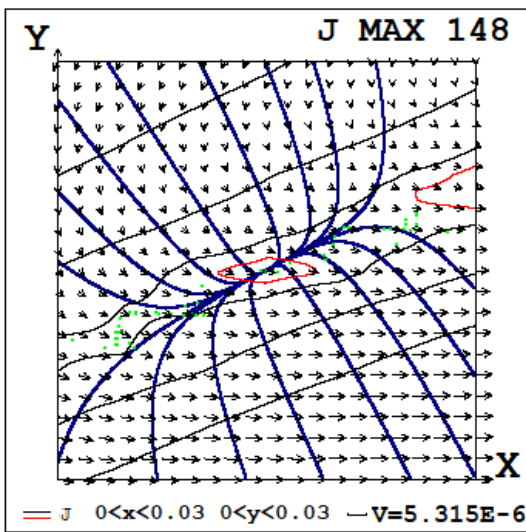
НА ДИСКЕ СОЛНЦА



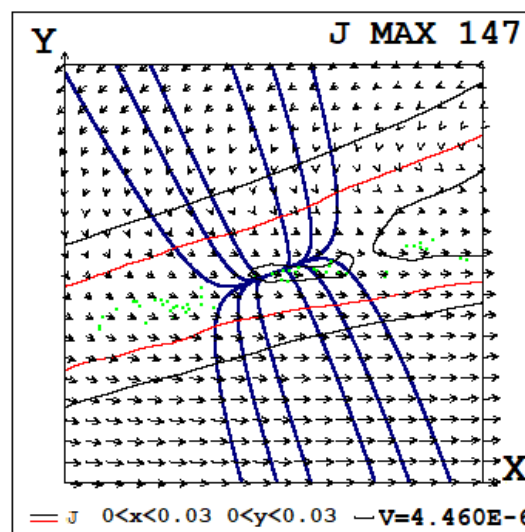




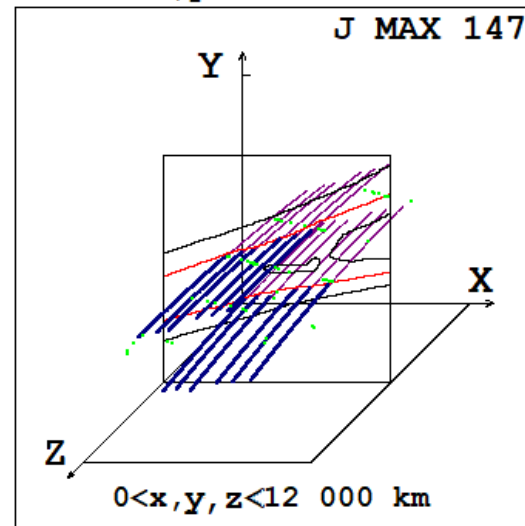
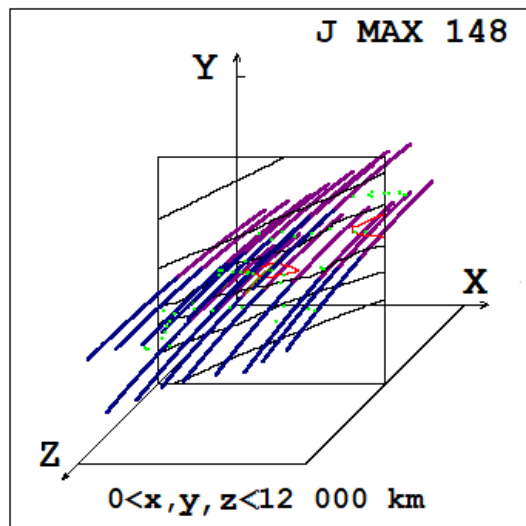
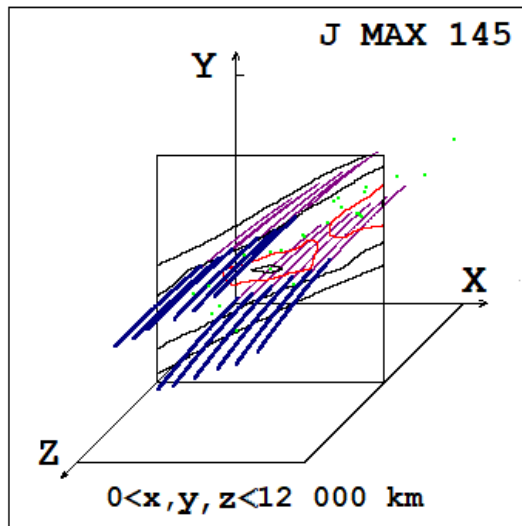
$0 < x, y < 12\ 000 \text{ km}$

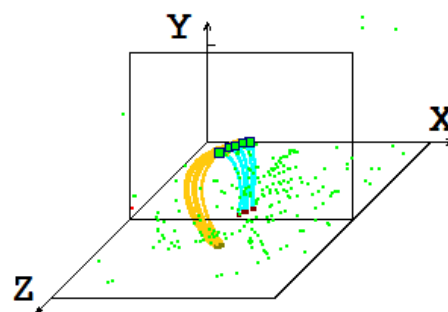
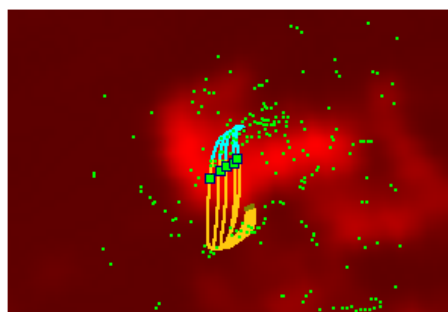
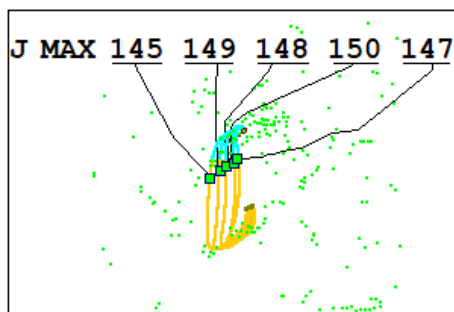


$0 < x, y < 12\ 000 \text{ km}$

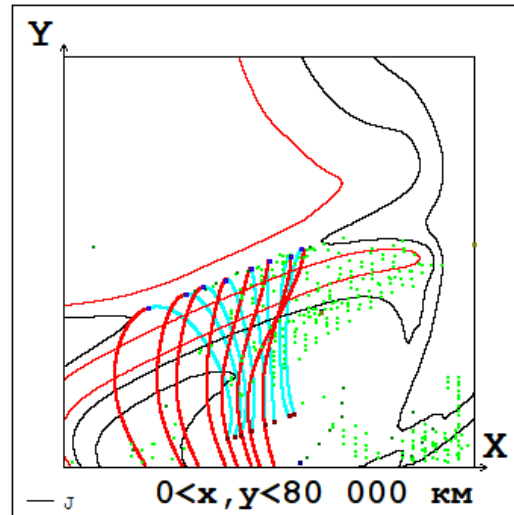
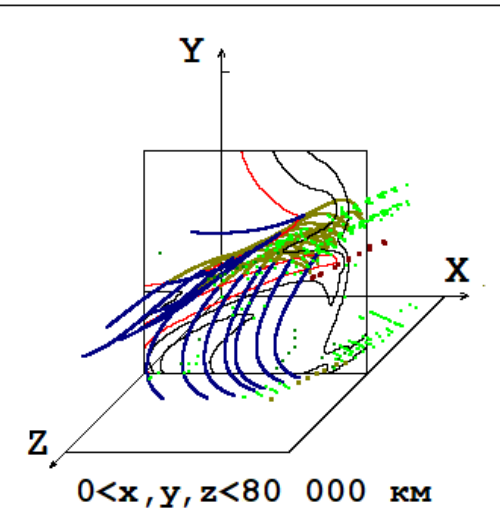
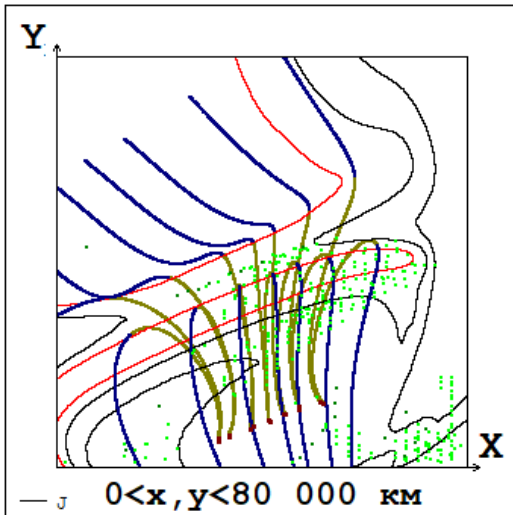
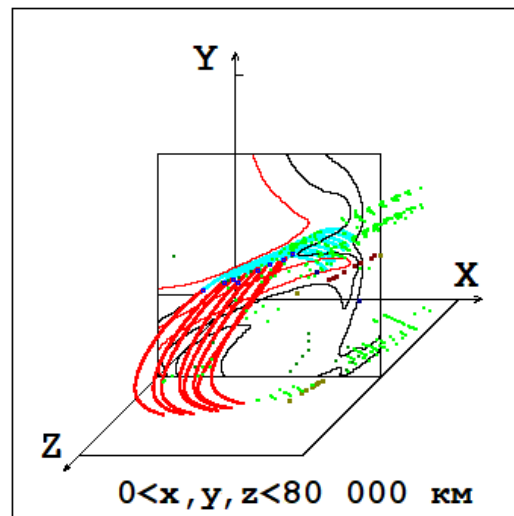
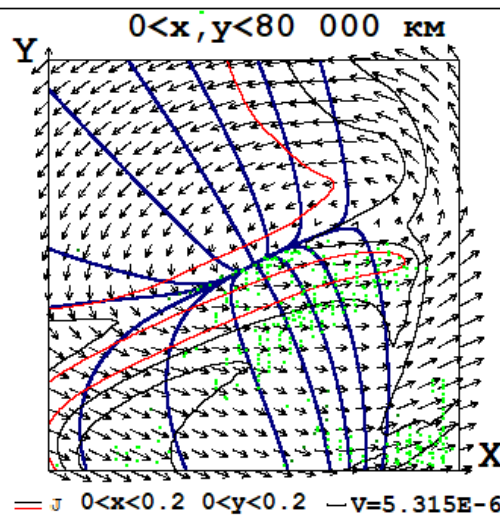
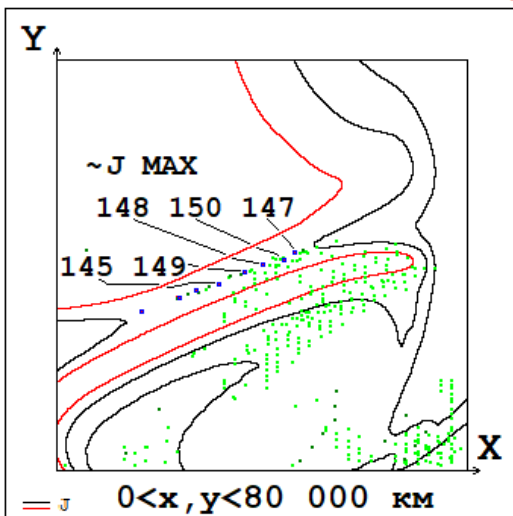


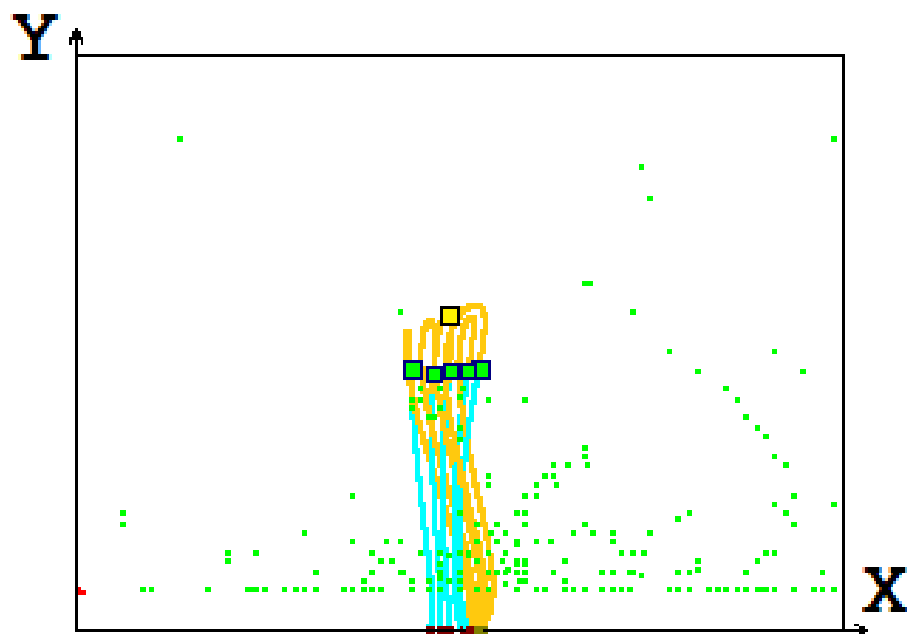
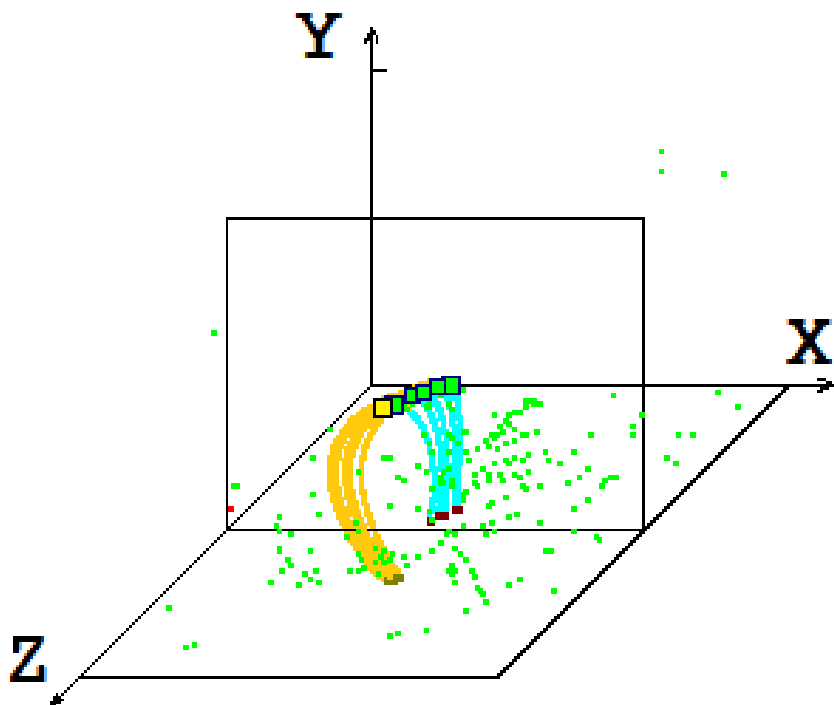
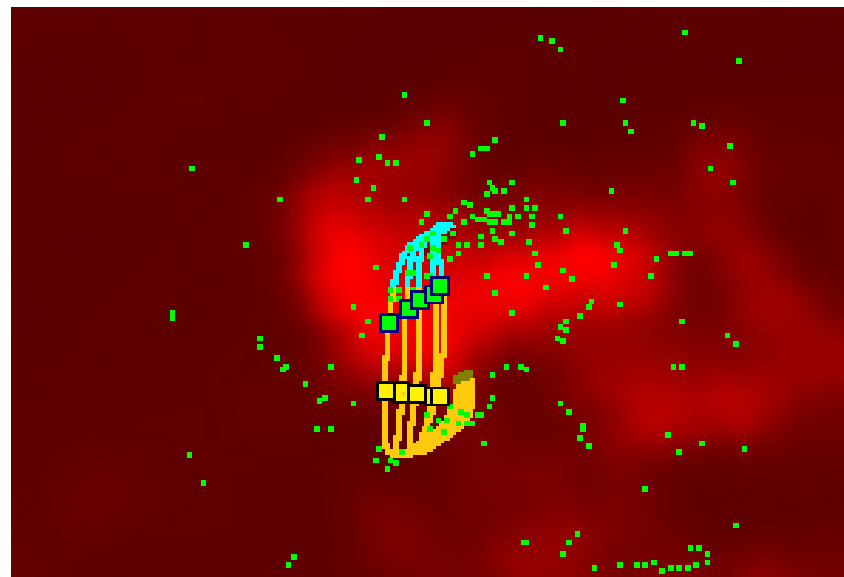
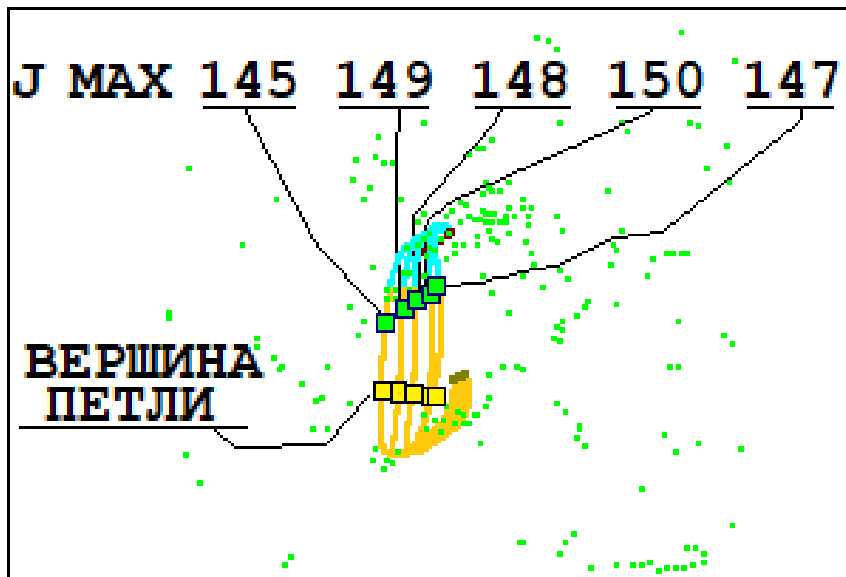
$0 < x, y < 12\ 000 \text{ km}$

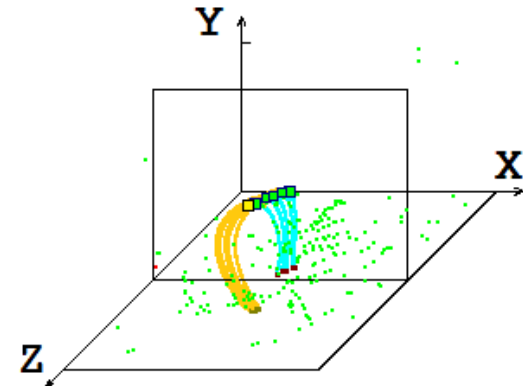
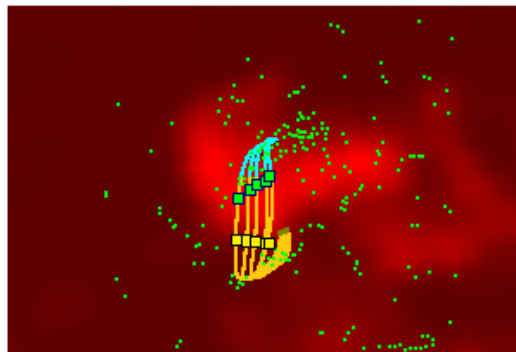
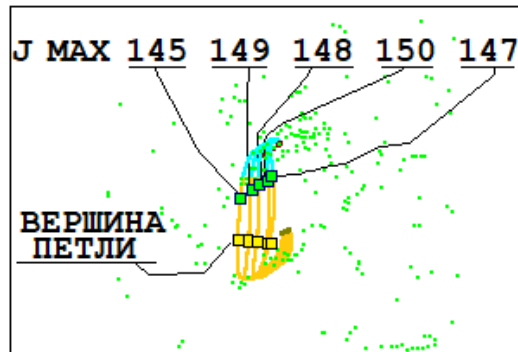




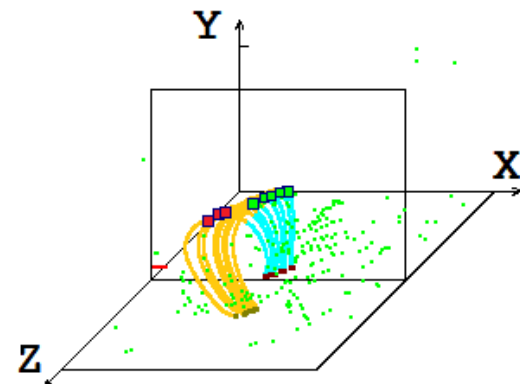
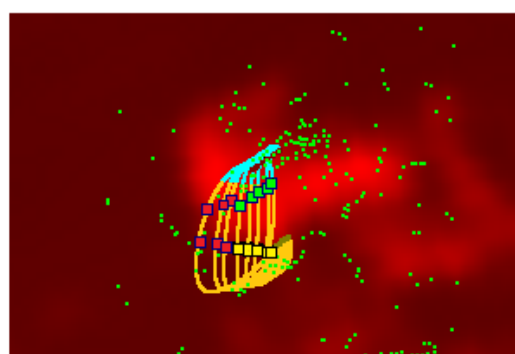
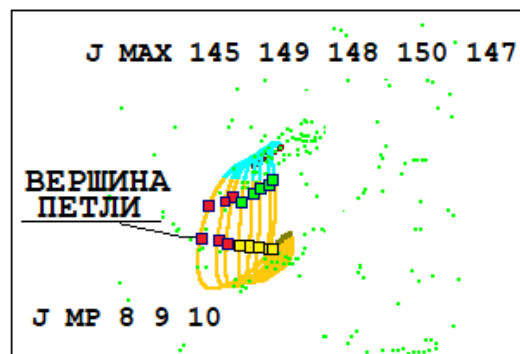
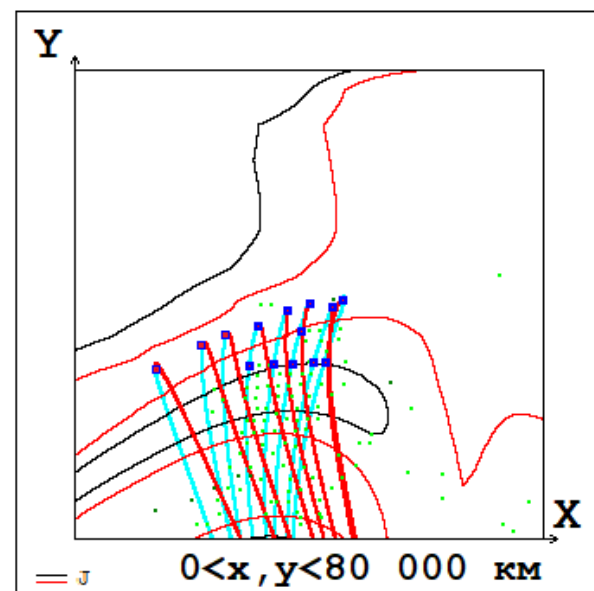
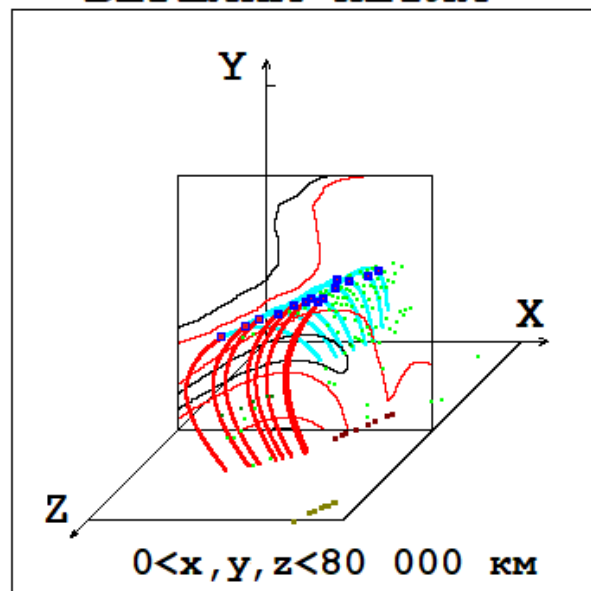
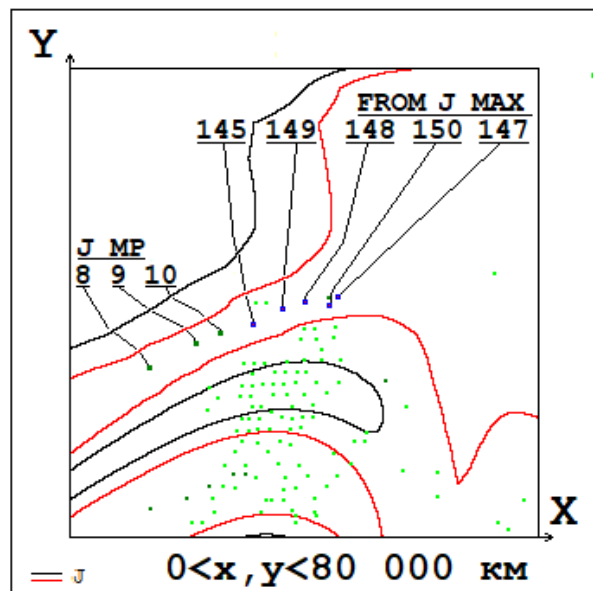
In the Box (Plane) $0 < x, y, z, < 80\ 000$ km with Center in J Max 148

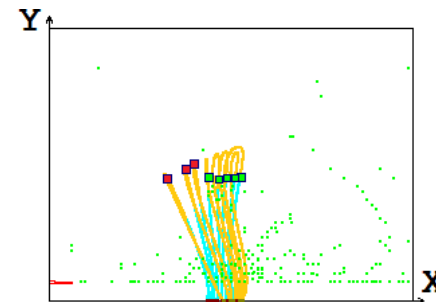
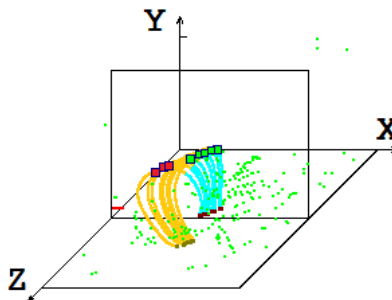
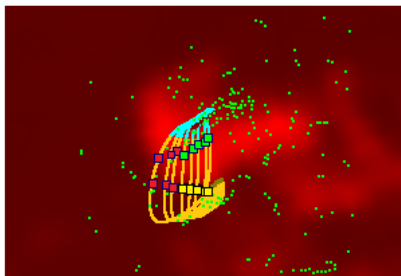
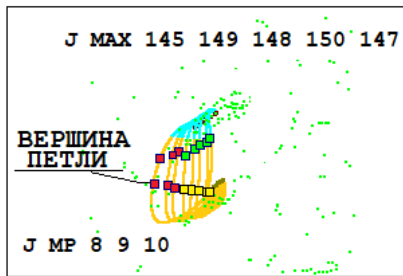




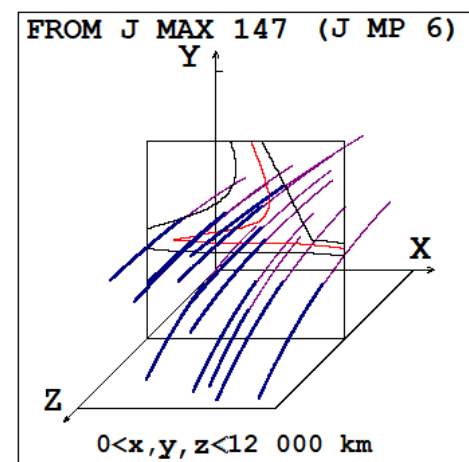
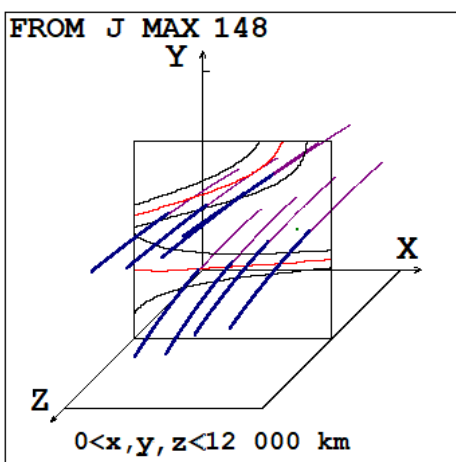
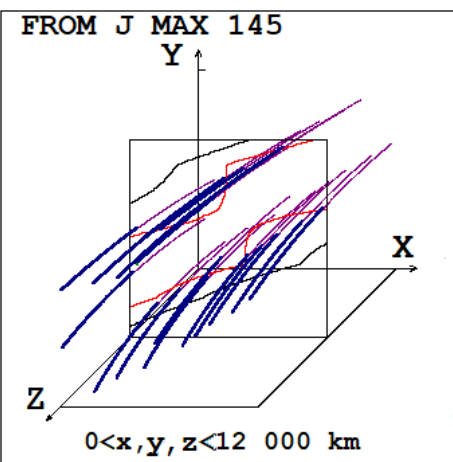
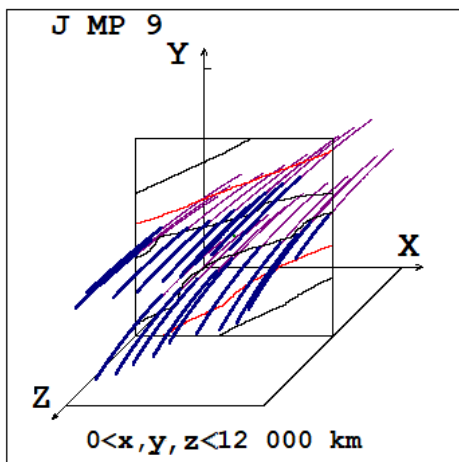
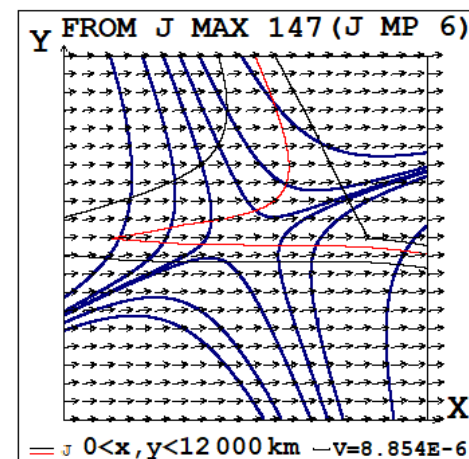
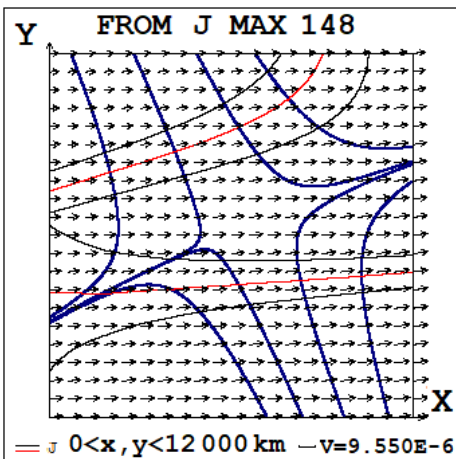
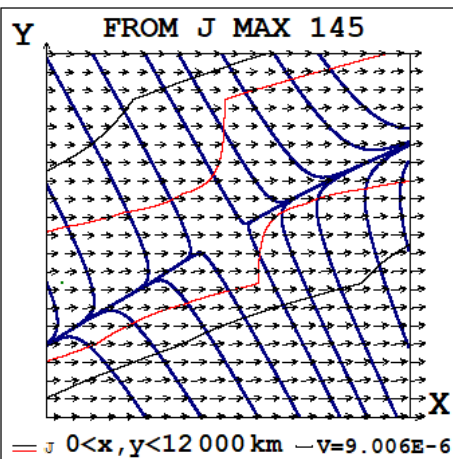
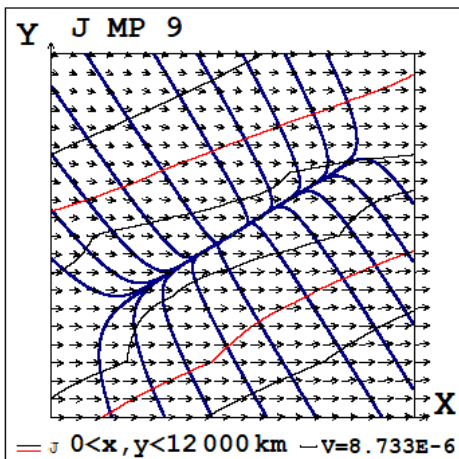


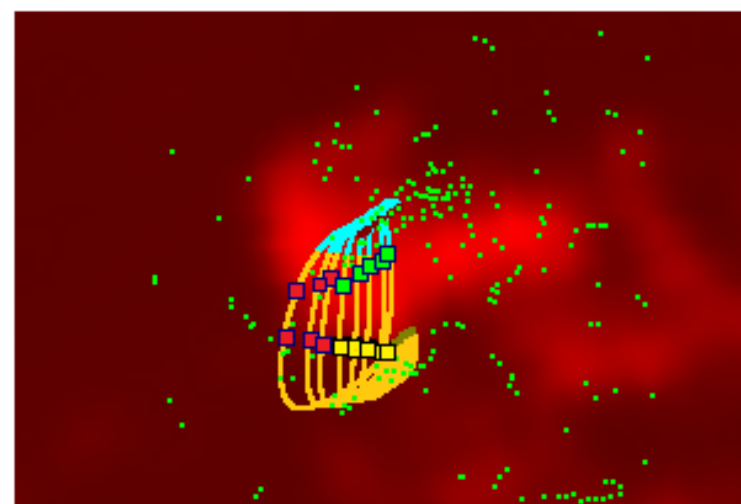
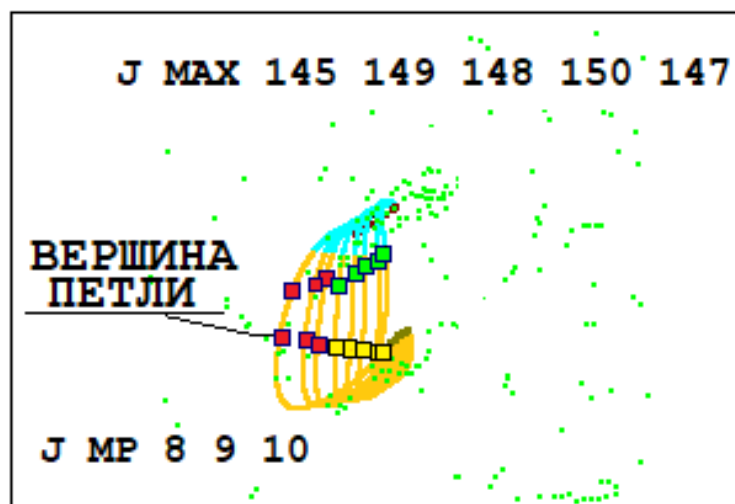
ВЕРШИНА ПЕТЛИ



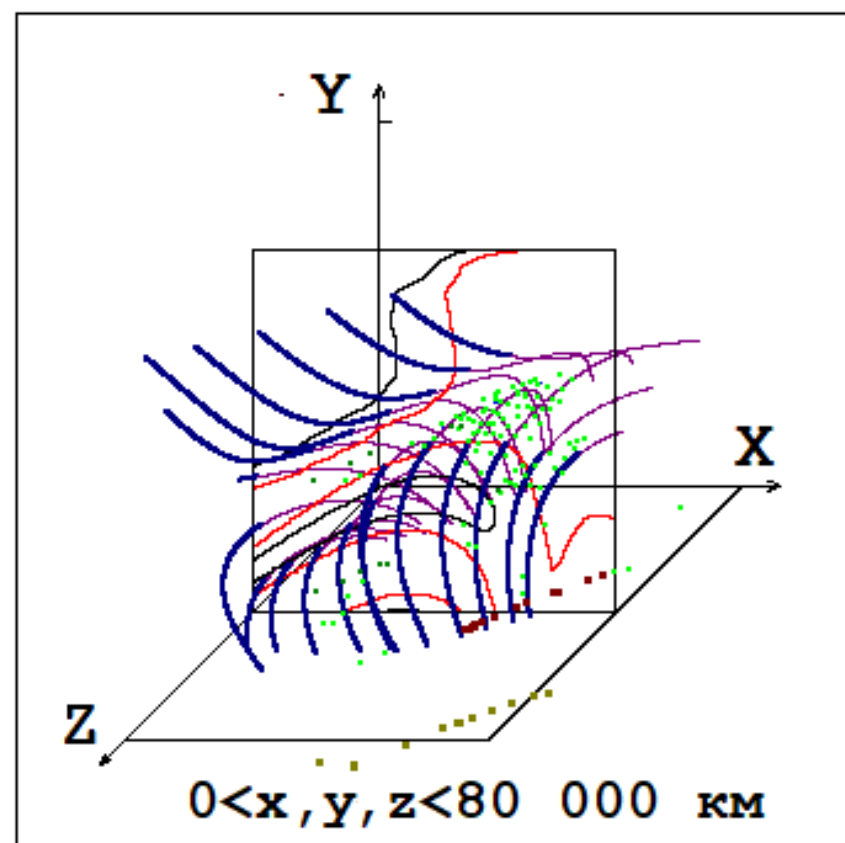
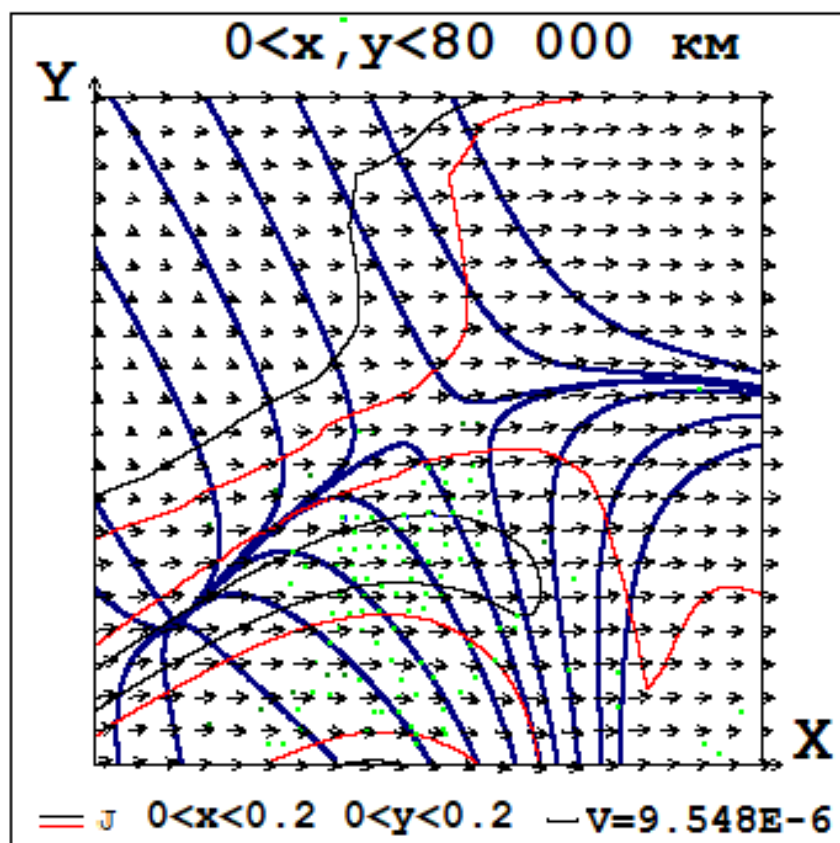


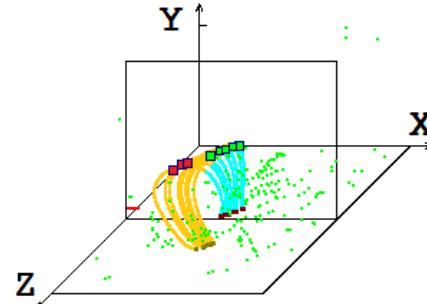
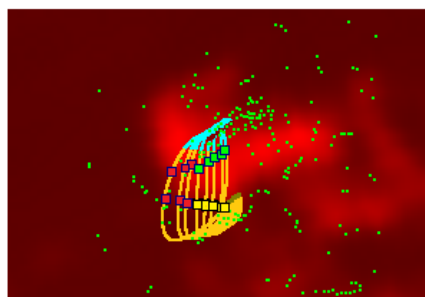
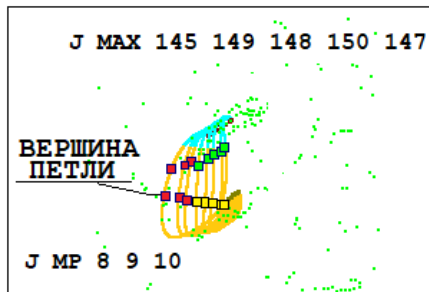
ВЕРШИНА ПЕТЛИ



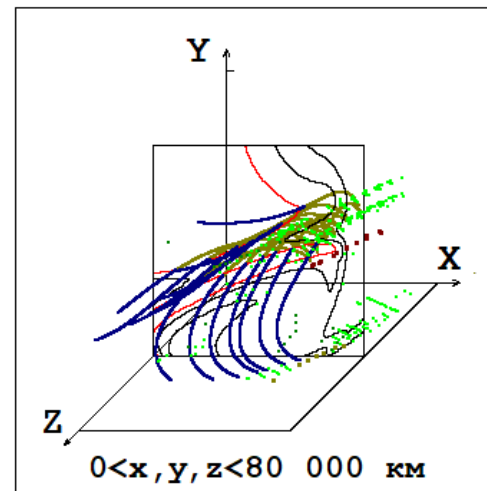
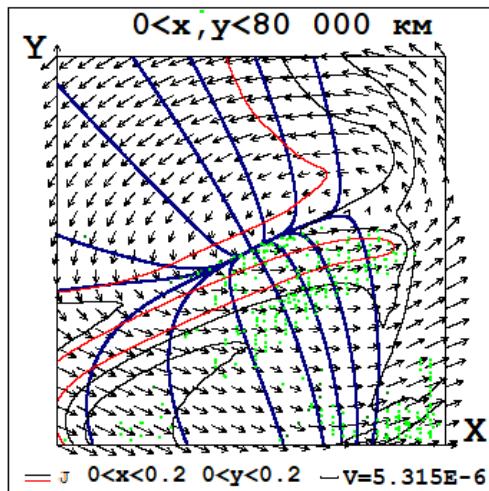
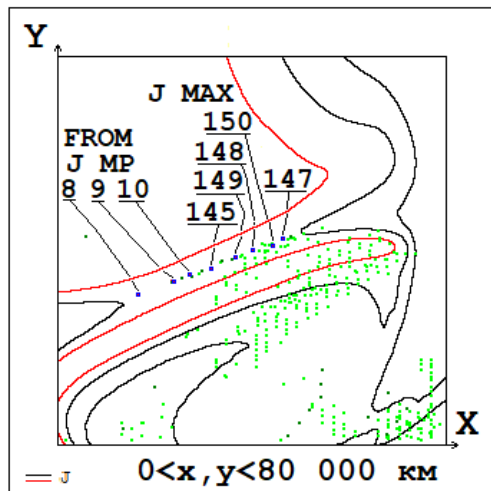


ВЕРШИНА ПЕТЛИ

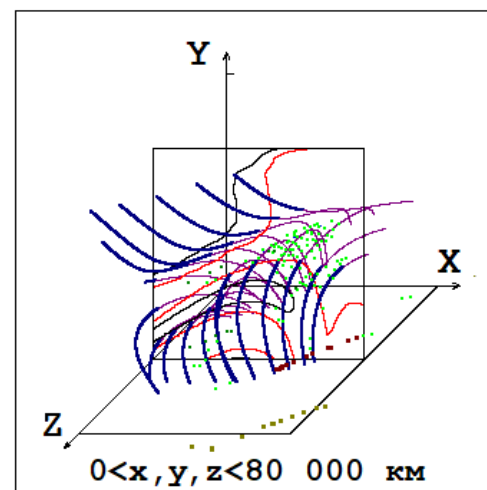
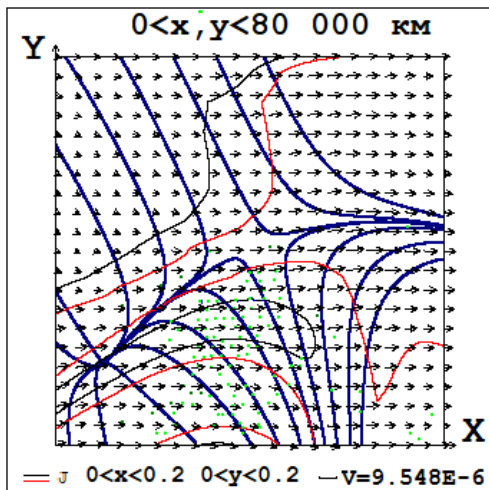
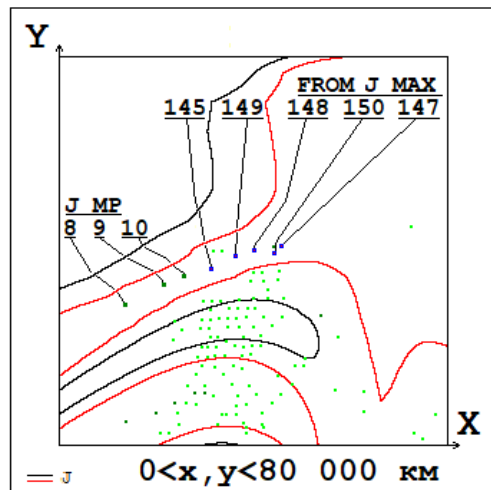


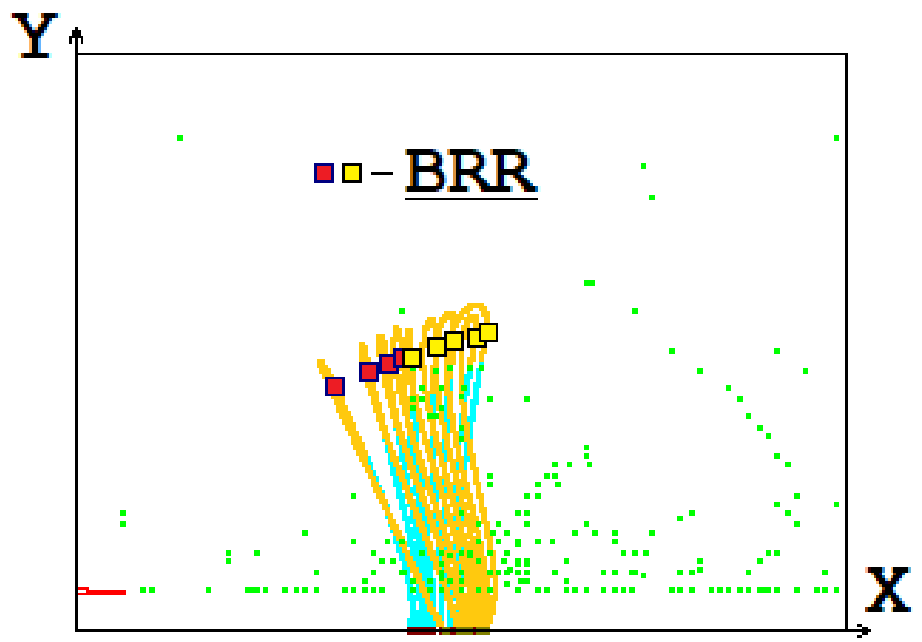
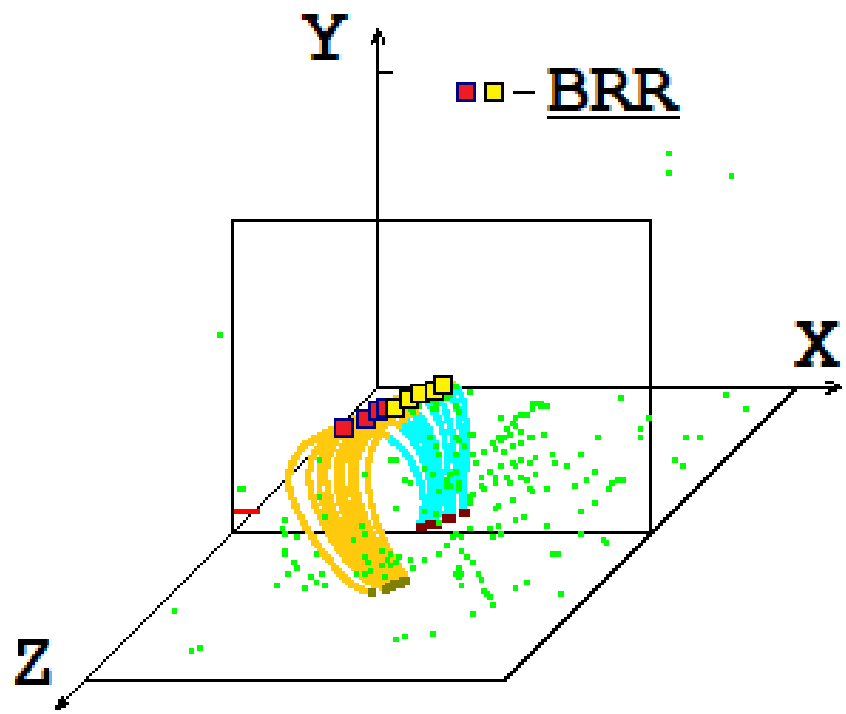
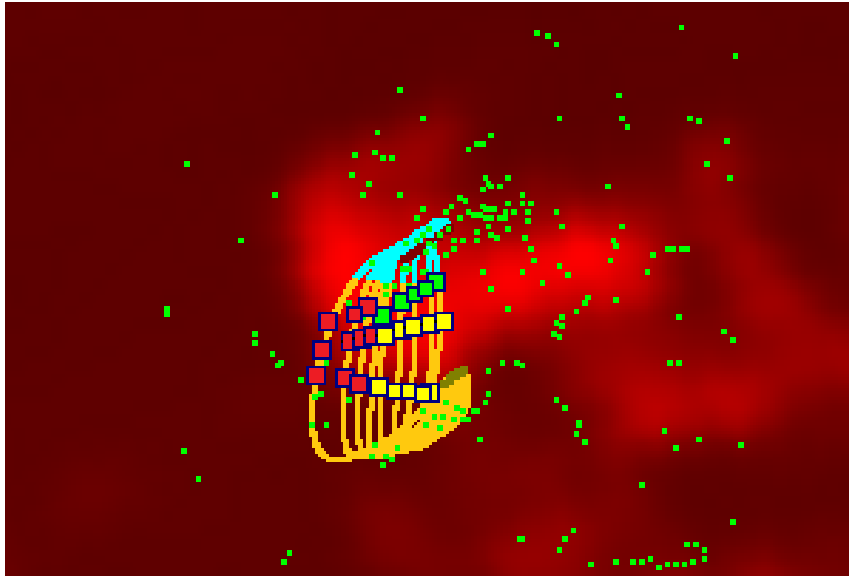
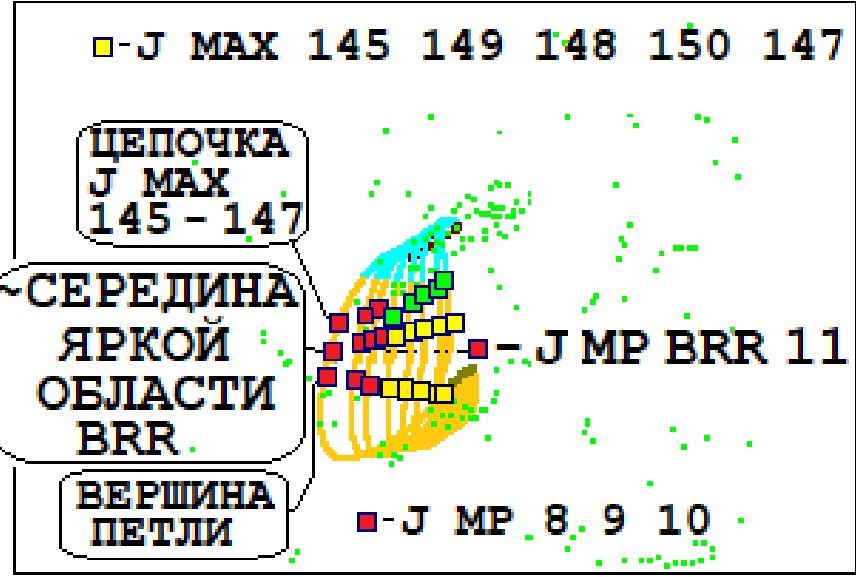


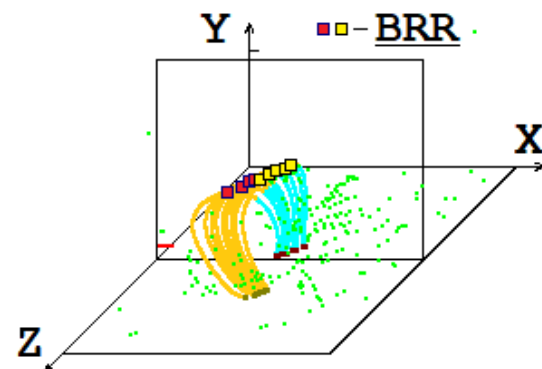
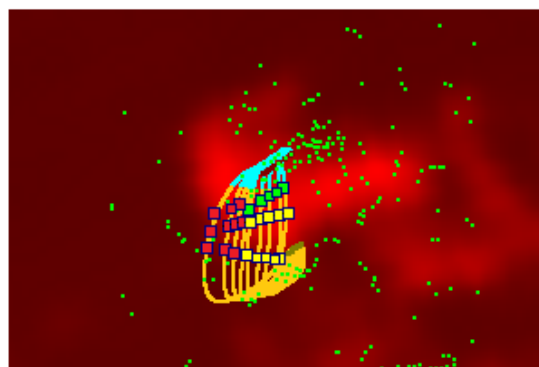
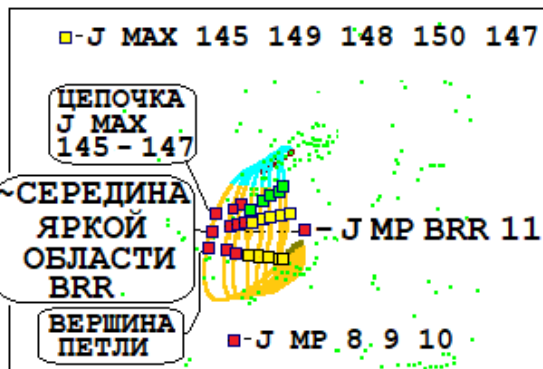
ЦЕПОЧКА J MAX 145 - 147



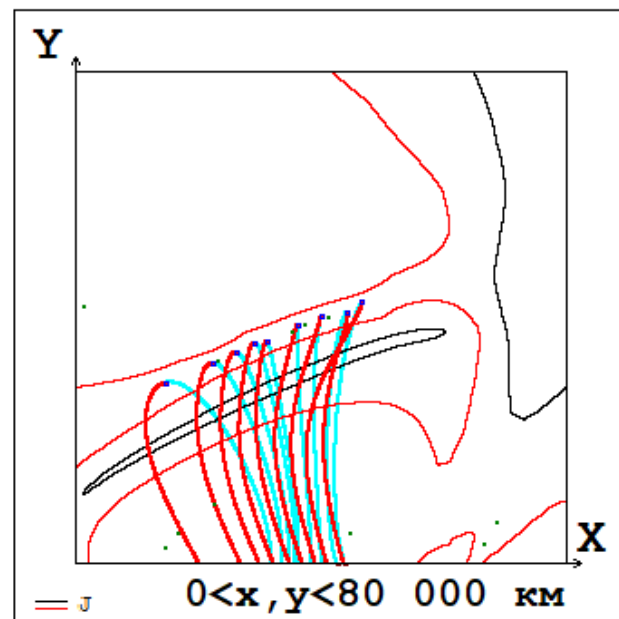
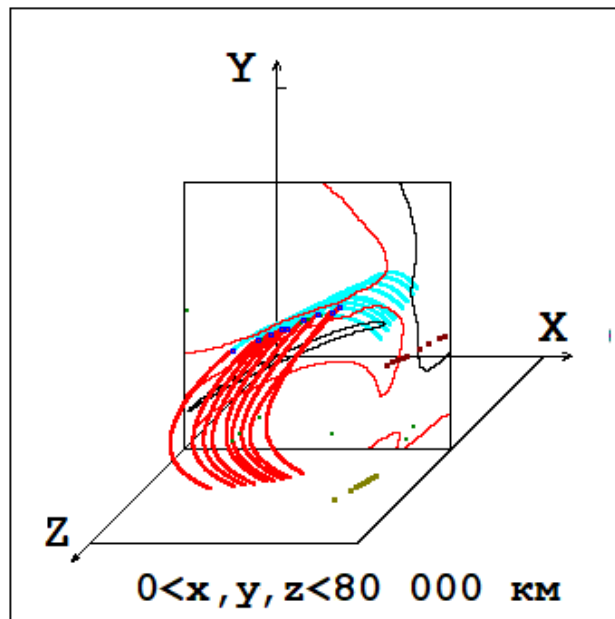
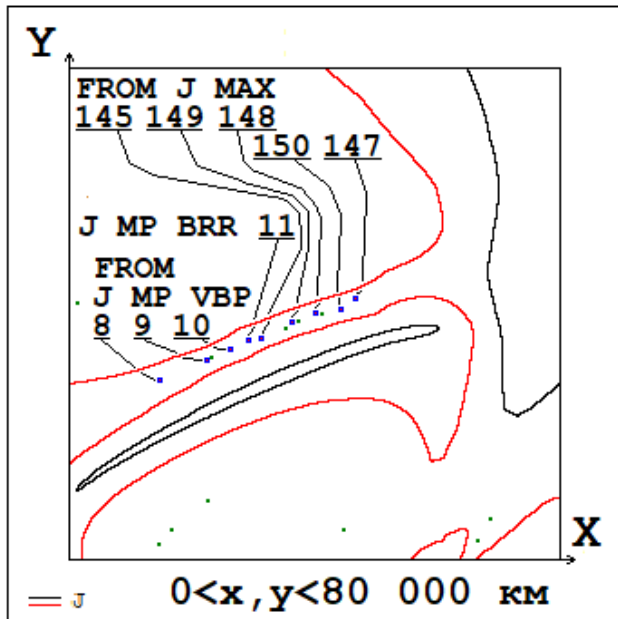
ВЕРШИНА ПЕТЛИ

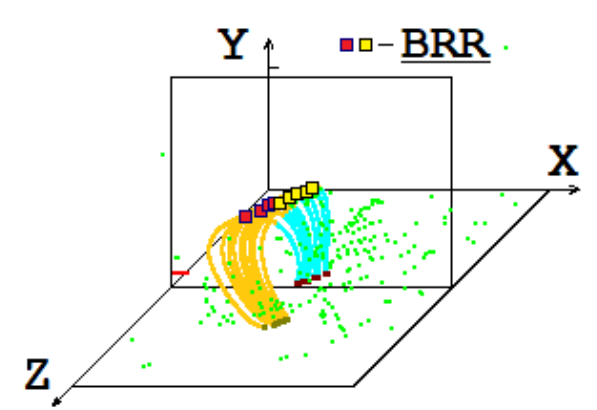
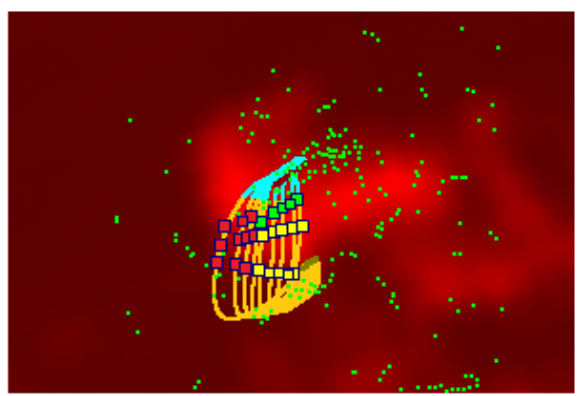
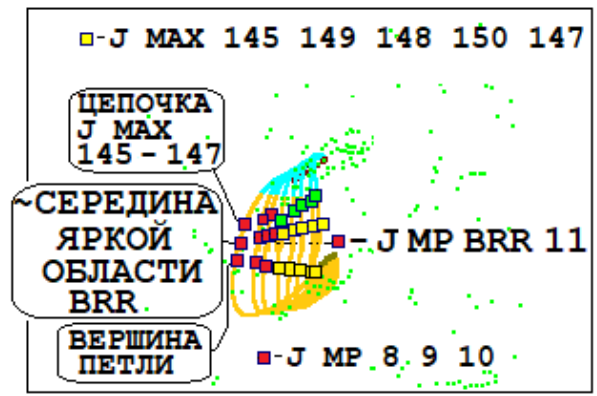




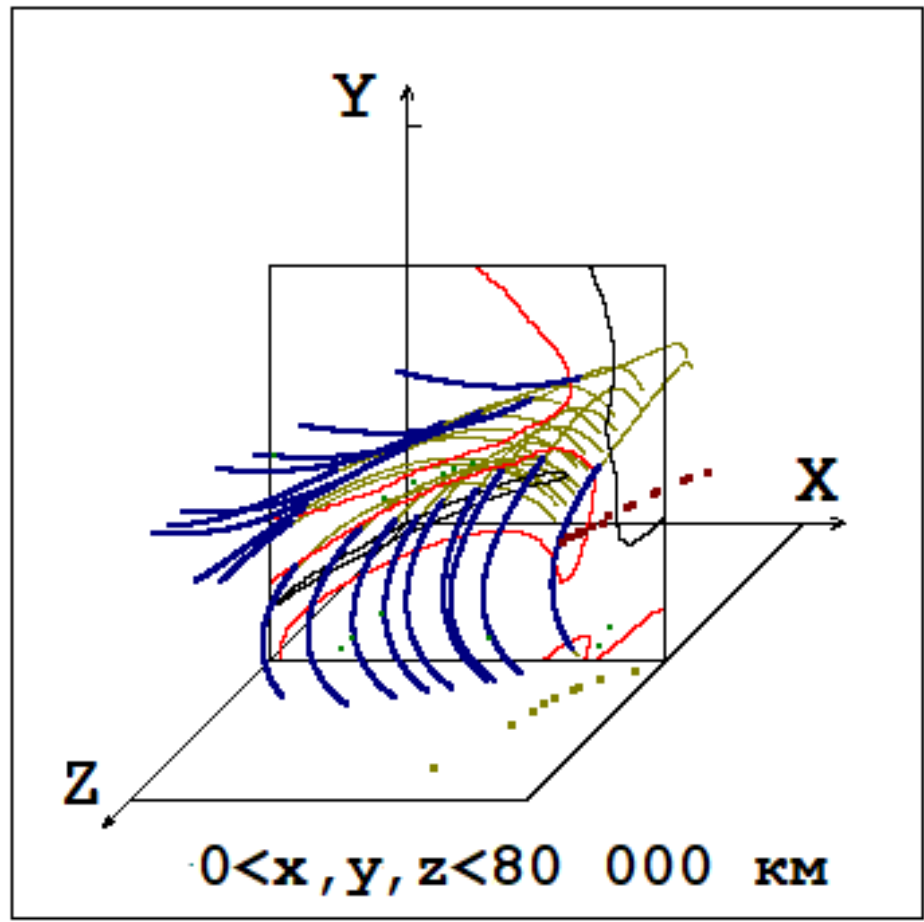
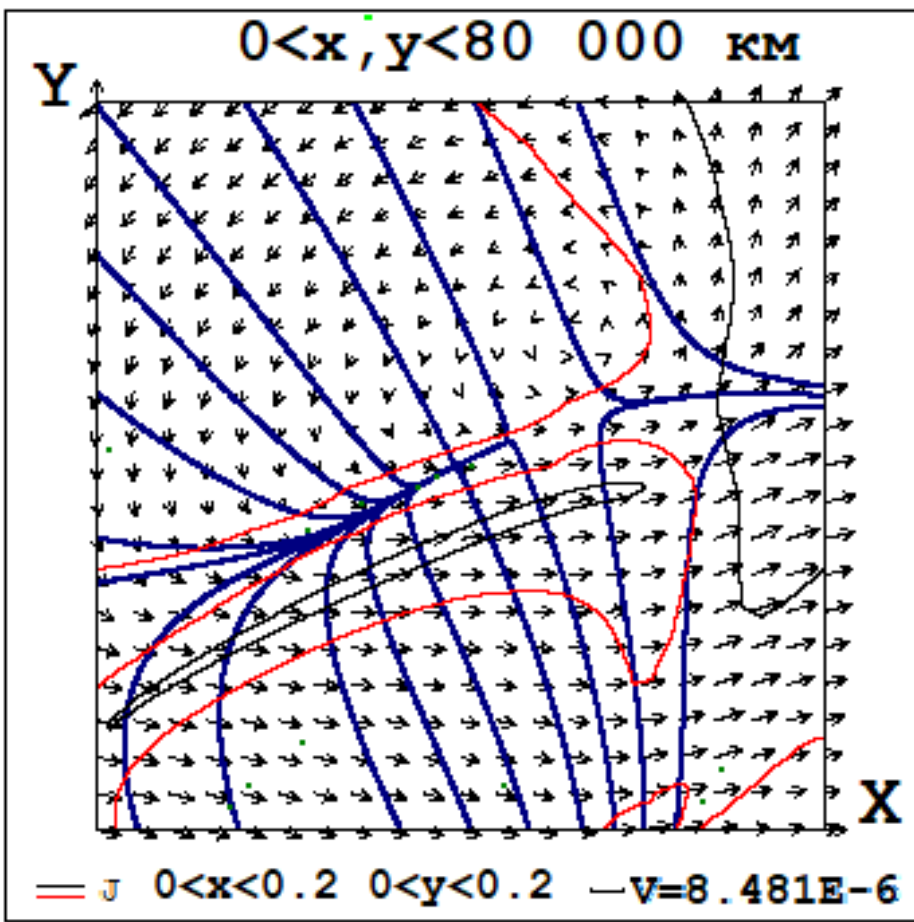


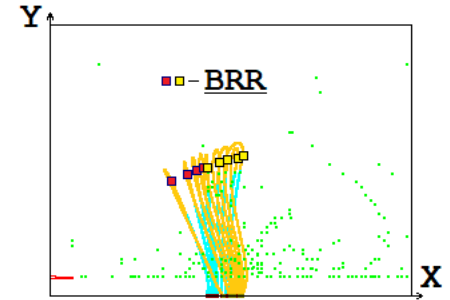
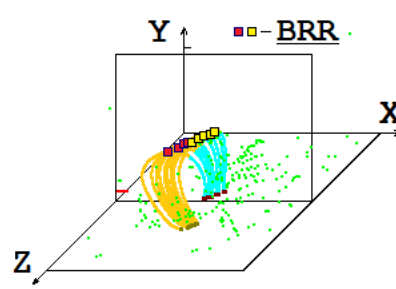
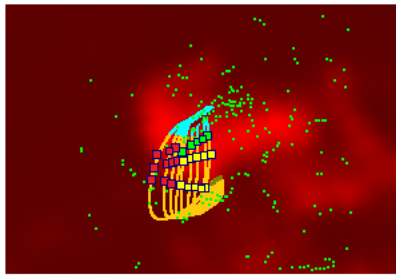
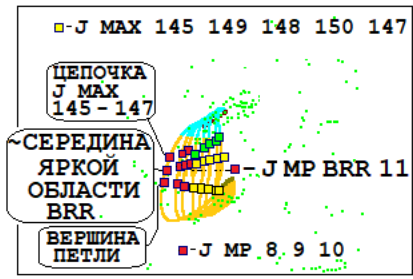
~СЕРЕДИНА ЯРКОЙ ОБЛАСТИ



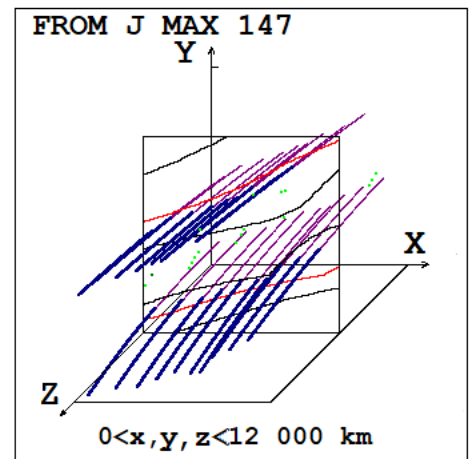
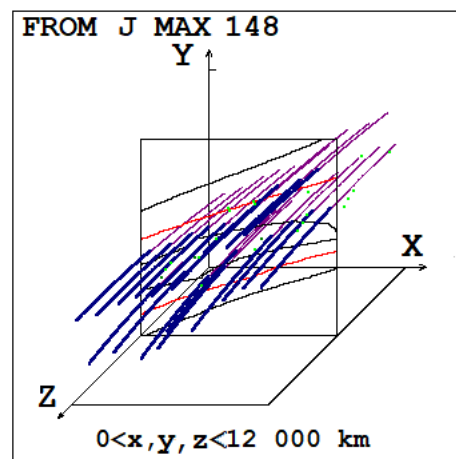
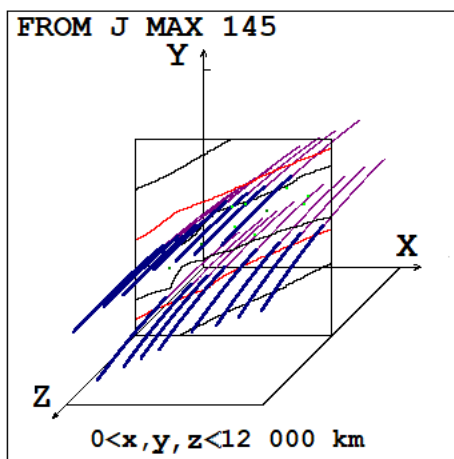
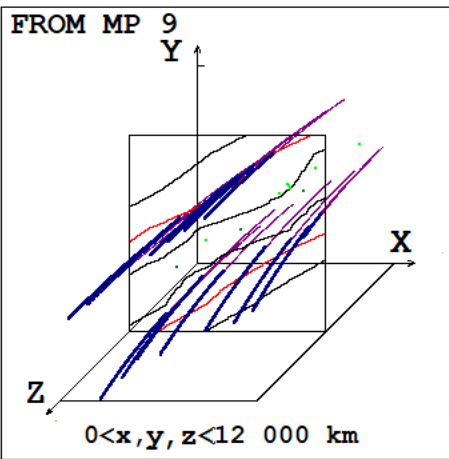
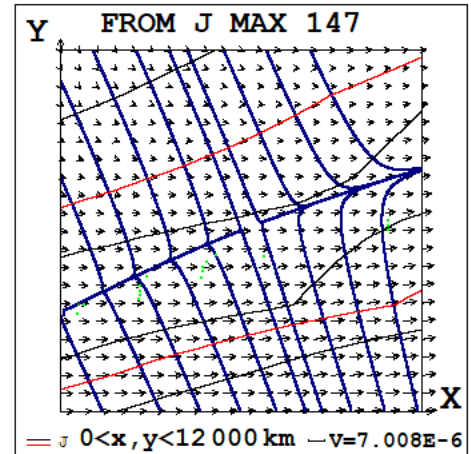
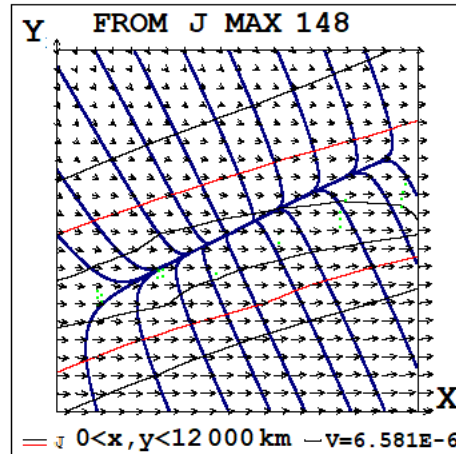
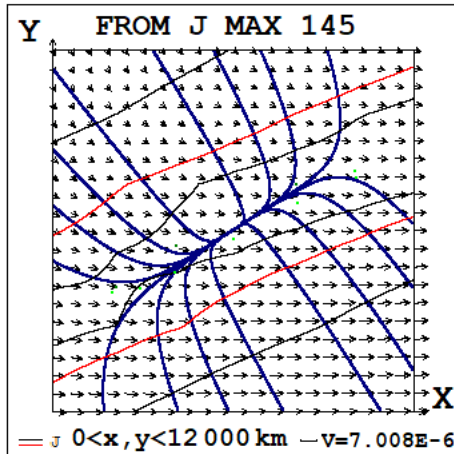
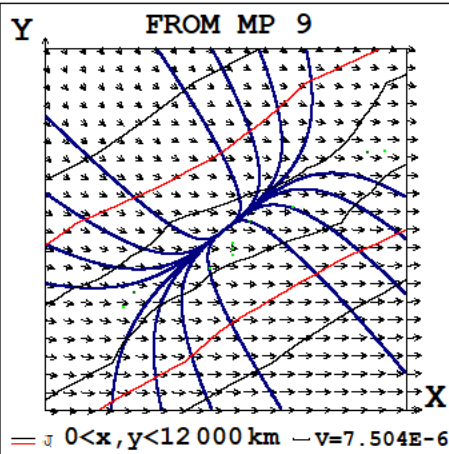


~СЕРЕДИНА ЯРКОЙ ОБЛАСТИ

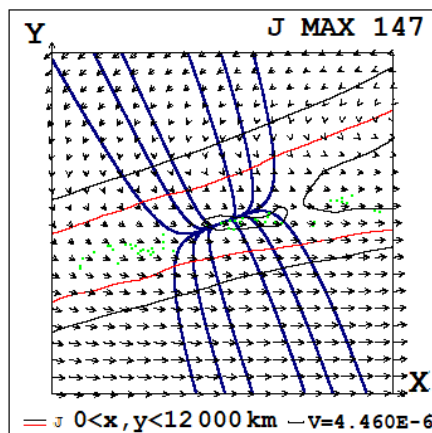
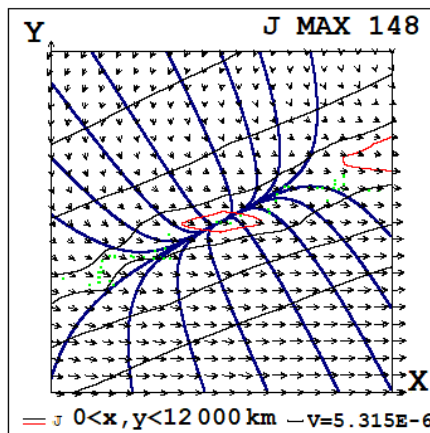
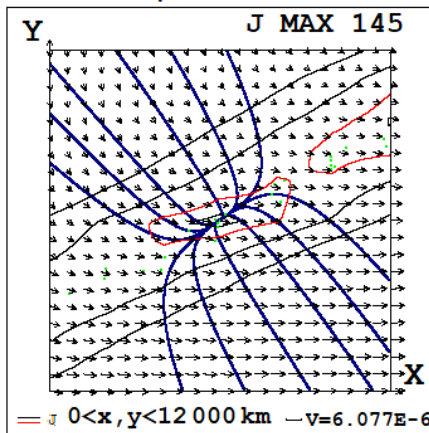
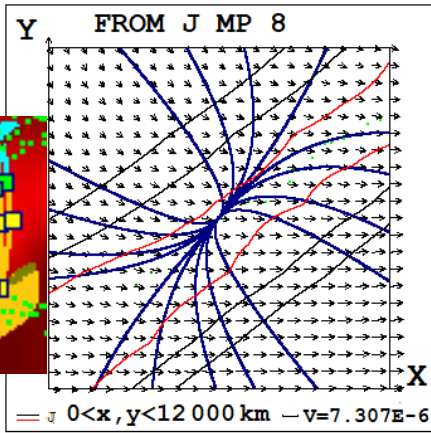




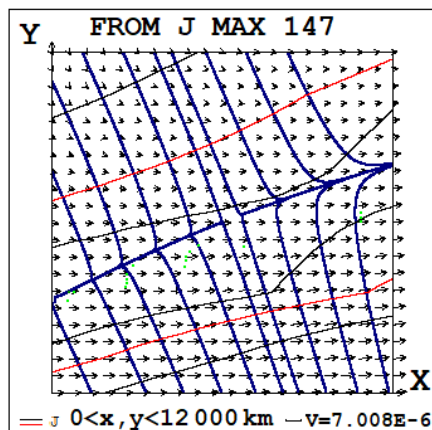
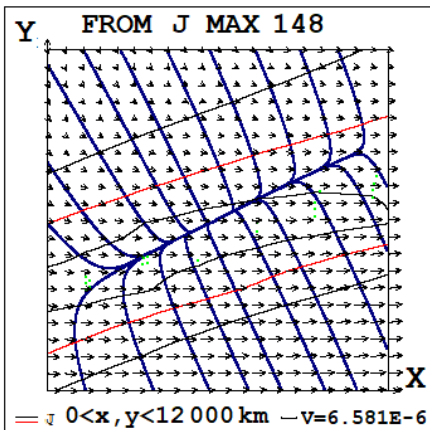
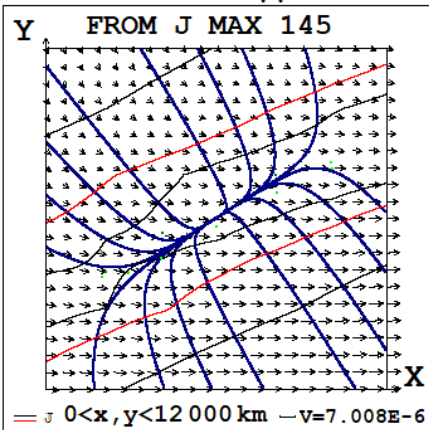
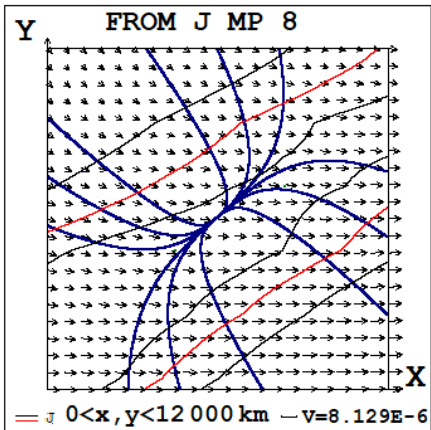
~СЕРЕДИНА ЯРКОЙ ОБЛАСТИ



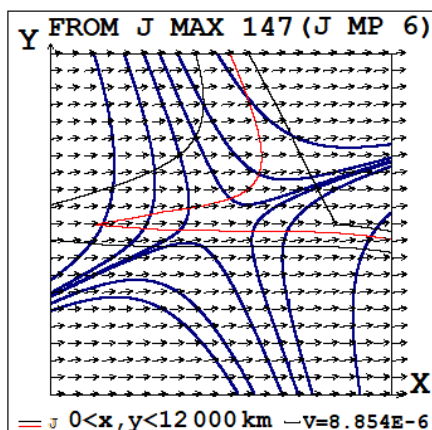
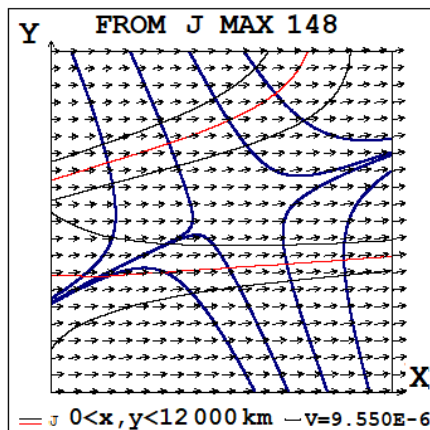
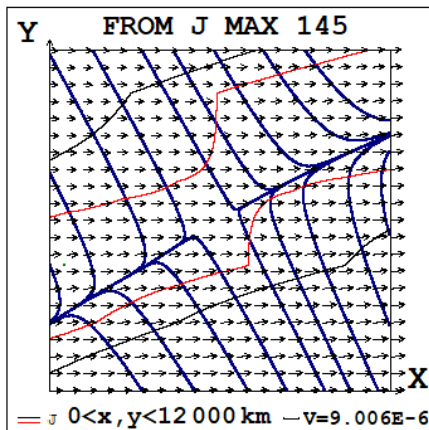
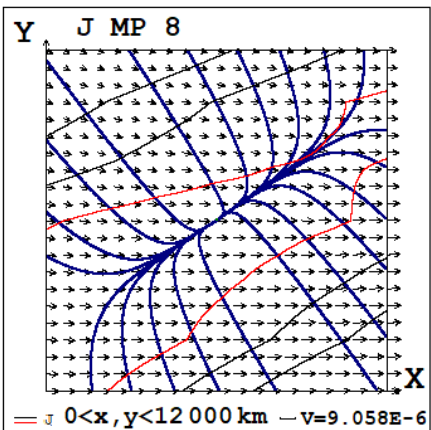
ЦЕПОЧКА J MAX 145 - 147



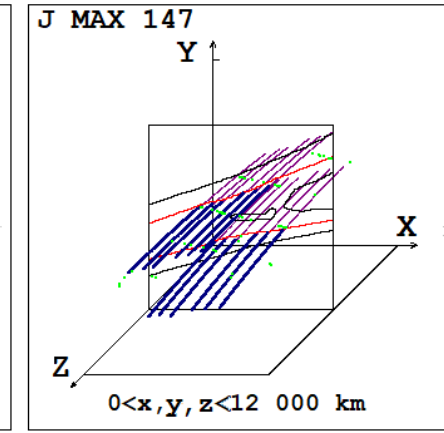
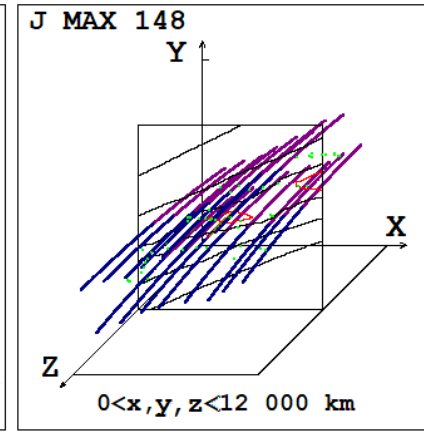
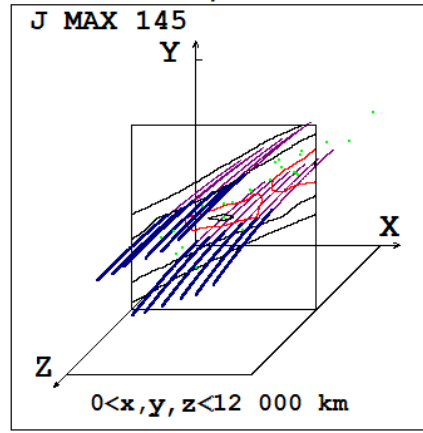
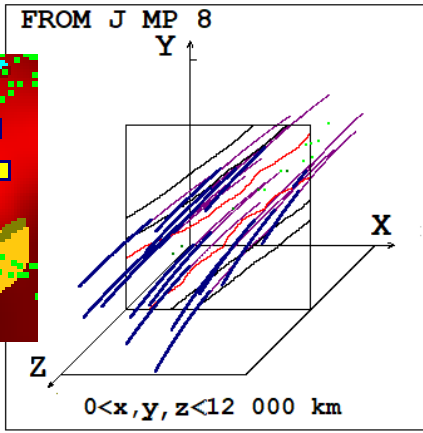
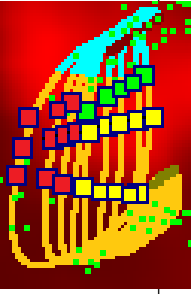
~СЕРЕДИНА ЯРКОЙ ОБЛАСТИ



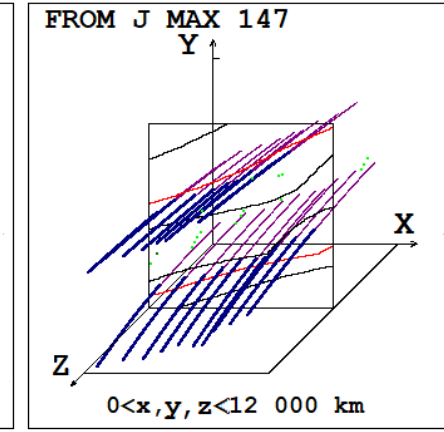
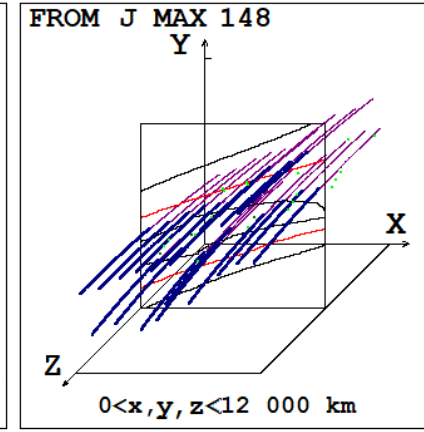
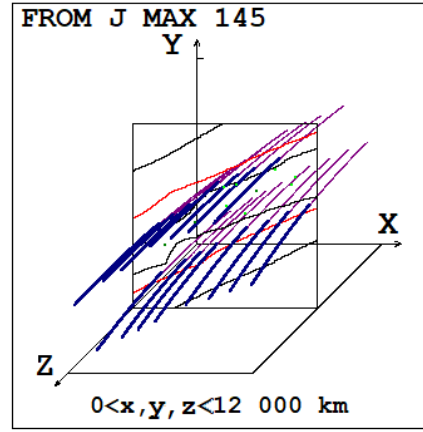
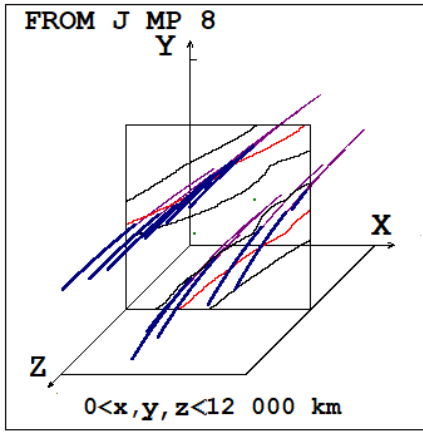
ВЕРШИНА ПЕТЛИ



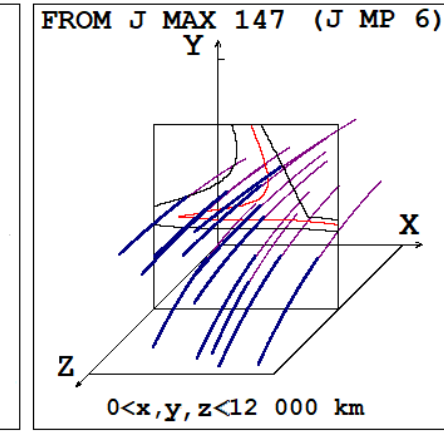
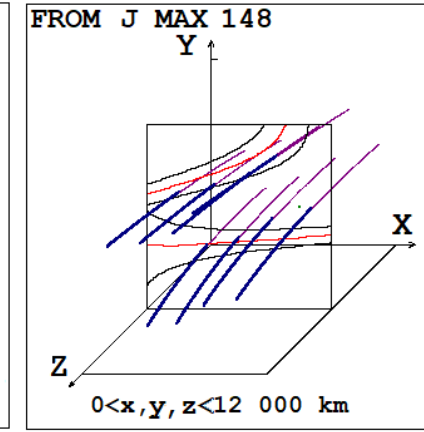
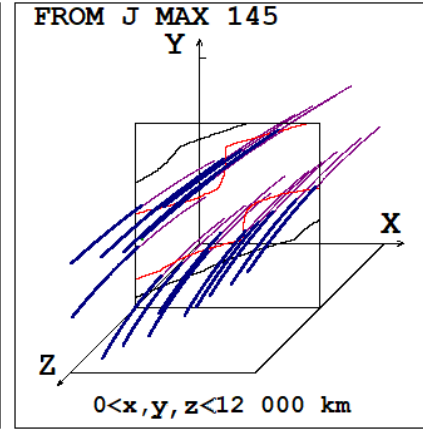
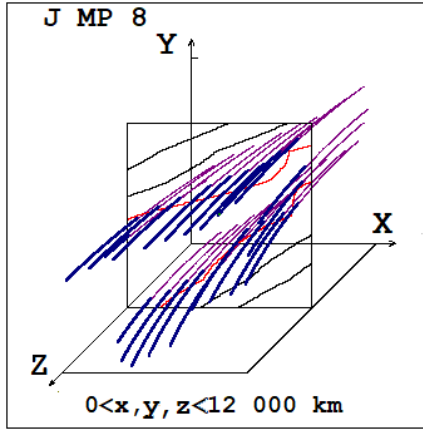
ЦЕПОЧКА J MAX 145 - 147



~СЕРЕДИНА ЯРКОЙ ОБЛАСТИ



БЕРШИНА ПЕТЛИ



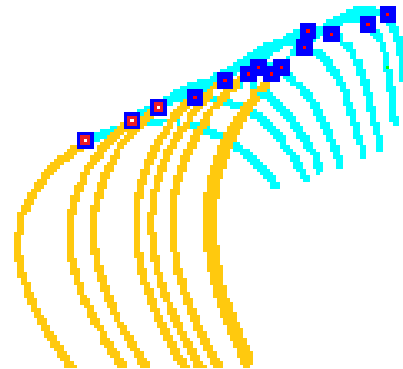
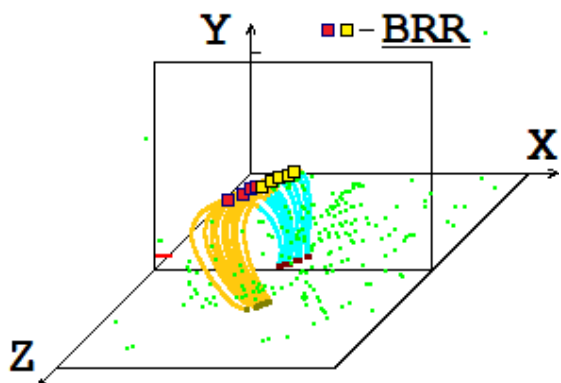
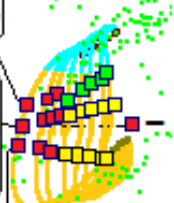
■-J MAX 145 149 148 150 147

ЦЕПОЧКА
J MAX
145 - 147

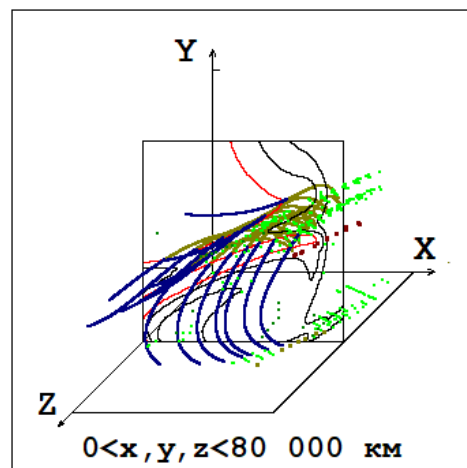
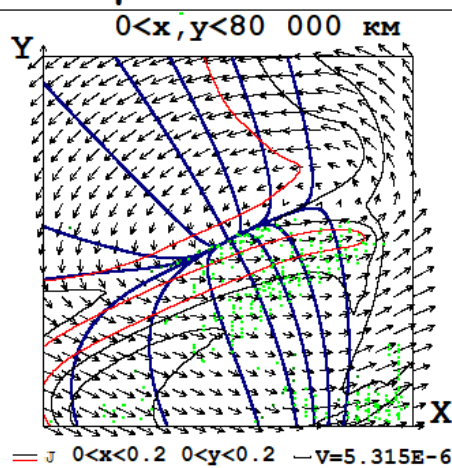
~СЕРЕДИНА
ЯРКОЙ
ОБЛАСТИ
BRR

ВЕРШИНА
ПЕТЛИ

■-J MP 8 9 10

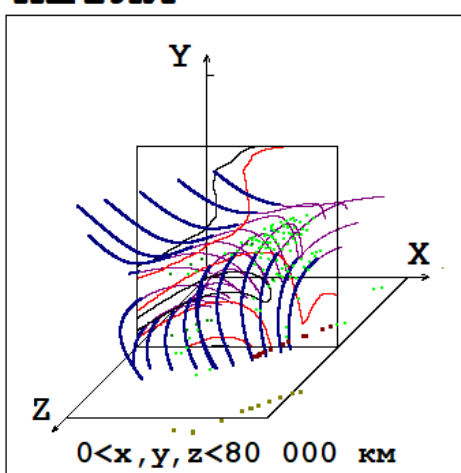
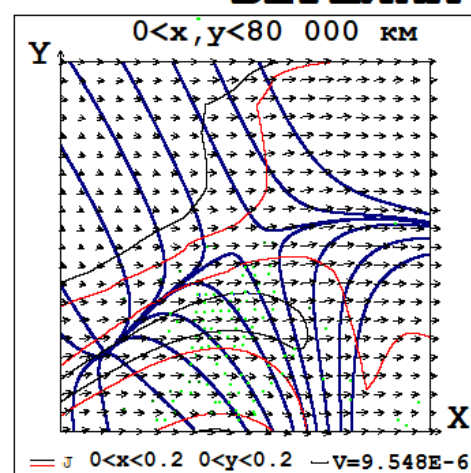
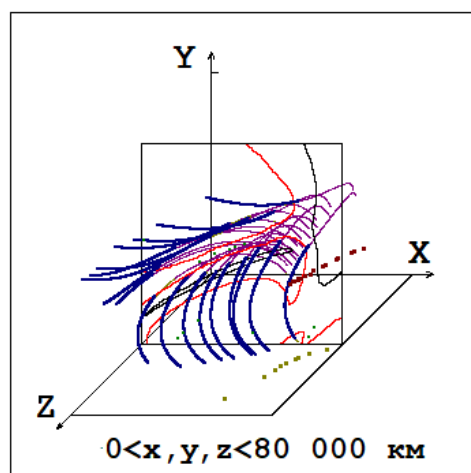
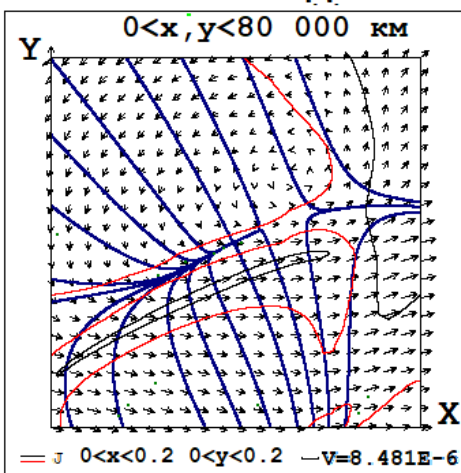


ЦЕПОЧКА J MAX 145 - 147



~СЕРЕДИНА ЯРКОЙ ОБЛАСТИ

ВЕРШИНА ПЕТЛИ



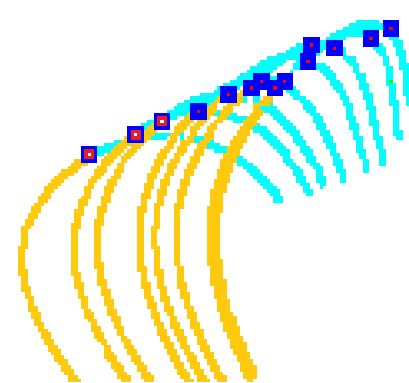
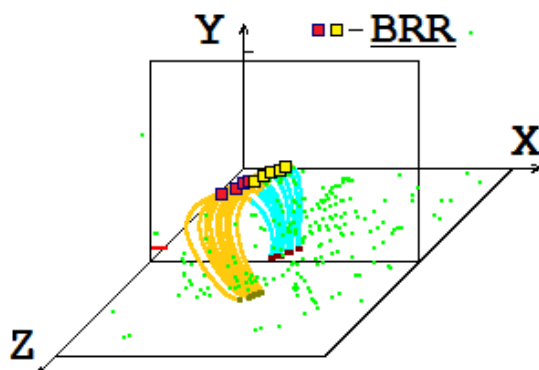
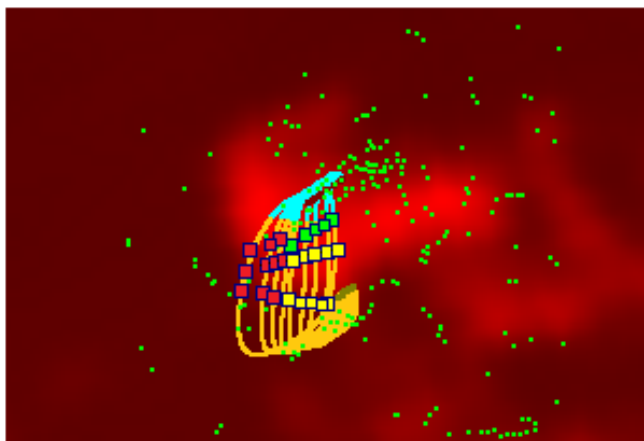
■ - J MAX 145 149 148 150 147

CHAIN OF
J MAX
145 - 147

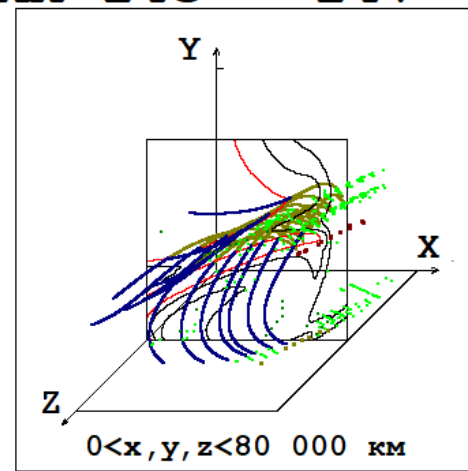
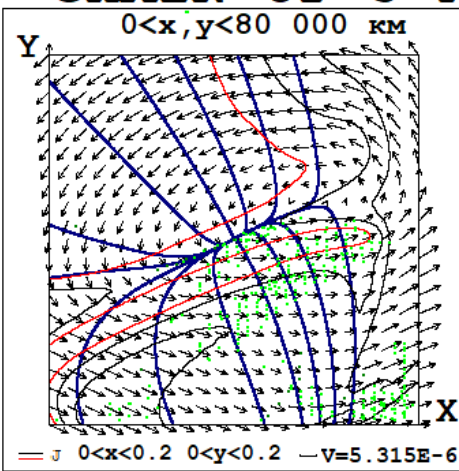
~MIDDLE
OF BRIGHT
REGION
BRR

TOP OF
THE LOOP

■ - J MP BRR 11
■ - J MP 8, 9 10

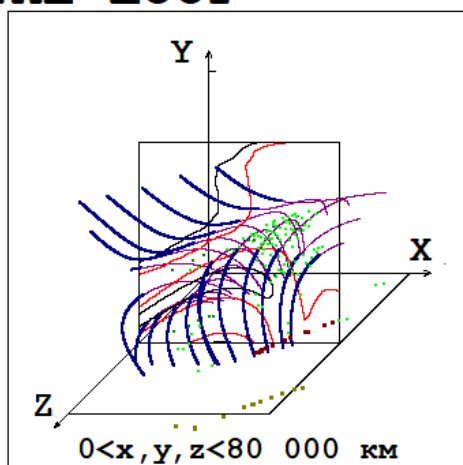
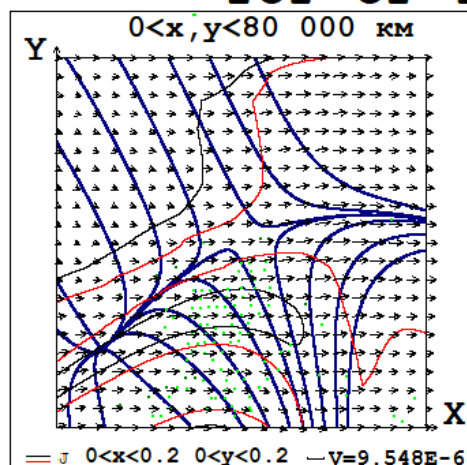
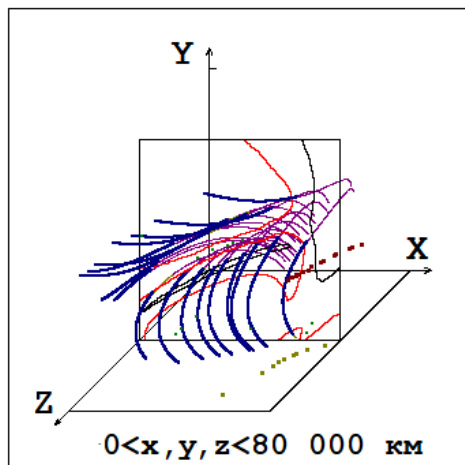
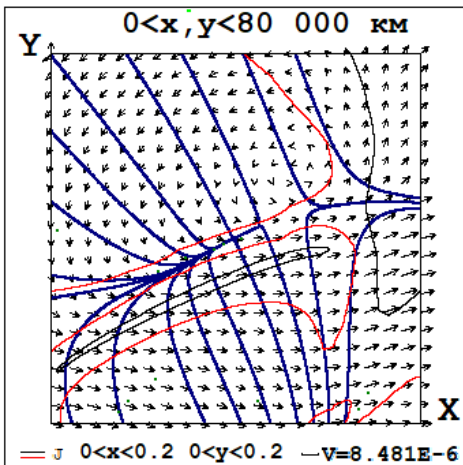


CHAIN OF J MAX 145 - 147



~MIDDLE OF BRIGHT REGION

TOP OF THE LOOP



Выводы

Основной вывод

Возникновение поверхности повышенной плотности тока проходящей через цепочку максимумов плотности тока, может решить проблему совпадения областей яркого вспышечного излучения с положениями вспышек, найденных из результатов МГД моделирования.

Выводы

Локальные выводы относительно свойств исследованного протяженного токового слоя

1. Условия, способствующие возникновению вспышечной неустойчивости (преобладание поля X-типа над расходящимся полем, уменьшение продольной компоненты магнитного поля) появляются в протяженном токовом слое в вершине петли, хотя максимумы плотности тока возникли на некотором расстоянии ($\sim 50\ 000$ км) от вершины петли.

2. Вблизи вершины петли в протяженном токовом слое условия, способствующие возникновению вспышечной неустойчивости появляются прежде всего в точках лежащих на магнитных линиях, проходящих через 3D максимумы плотности тока, а не в точках 2D максимумов плотности тока на поверхности, перпендикулярной магнитному полю.

??? Пока непонятно, насколько можно обобщить эти свойства на другие протяженные поверхности с повышенной плотностью тока (??? проходящие через цепочки максимумов плотности тока)

Выводы

- 1. Физический механизм солнечной вспышки может быть изучен только путем МГД моделирования в солнечной короне над активной областью, когда все условия берутся из наблюдений, и расчет начинается за несколько суток до появления вспышек, когда в короне еще не была накоплена энергия для вспышки.**
- 2. Разработана методика МГД моделирования в солнечной короне: разработана абсолютно неявная противопоточная конечно-разностная схема, консервативная относительно магнитного потока, проведено распараллеливание вычислений на графических процессорах (GPU) по технологии CUDA. Разработаны методы, позволившие частично решить проблему стабилизации численных неустойчивостей, возникающих вблизи границы расчетной области. Результаты МГД моделирования показали необходимость дальнейшего улучшения методики численного решения и анализа результатов.**

Выводы

3. Расчеты показали, что конфигурация магнитного поля над активной областью настолько сложная, что положения особых линий и образующихся на них токовых слоев можно найти только при помощи специально разработанной графической системы, основанной на поиске положений максимумов плотности тока. Анализ показал необходимость модернизации системы графического поиска согласно последним представлениям о появлении конфигурации с протяженным токовым слоем с 2D максимумами плотности тока в плоскости, перпендикулярной магнитной линии.

4. Вблизи максимумов плотности тока часто на конфигурацию магнитного поля X-типа накладывается расходящееся магнитное поле. Однако, даже при таком наложении, вследствие присутствия поля X-типа, в некоторых случаях может образоваться достаточно мощный токовый слой.

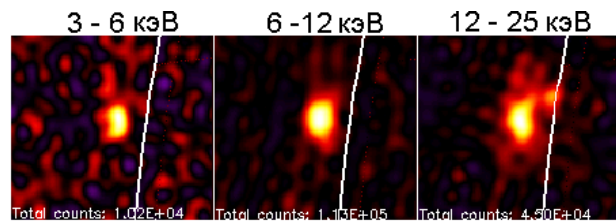
Выводы

5. Проблему совпадения полученных в результате МГД моделирования положений вспышек с наблюдаемыми положениями вспышек могут решить представления о накоплении энергии в протяженном токовом слое. Самые последние исследования показывают, что, положение вспышки находится на вершине петли магнитных линий, проходящих через близко расположенные максимумы плотности тока, образующие цепочку. Точки цепочки максимумов плотности тока и поверхность проходящих через нее магнитных линий расположены в области увеличенной плотности тока, которая представляет собой протяженный на несколько десятков тысяч километров токовый слой. В центре такого токового слоя достигается 2D максимум плотности тока в плоскости, перпендикулярной магнитной линии, но при этом не обязательно должен достигаться 3D максимум плотности тока. Эти представления в дальнейшем нуждаются в проверке путем более точных расчетов с использованием модернизированной методики и более детального анализа конфигураций поля в короне.

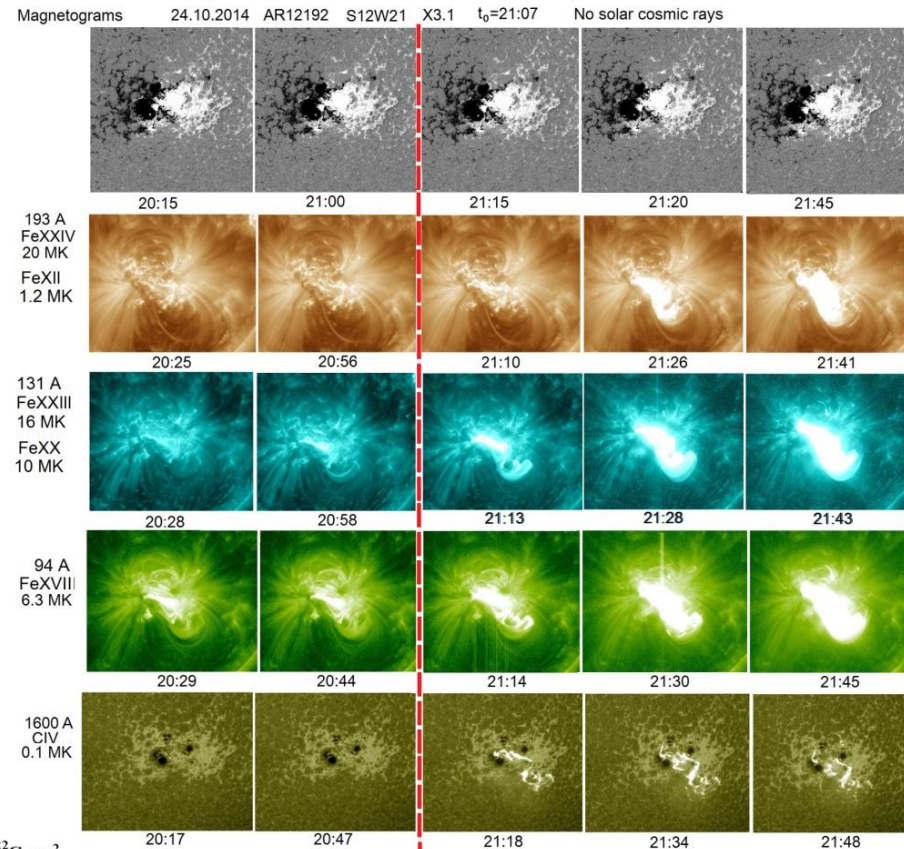
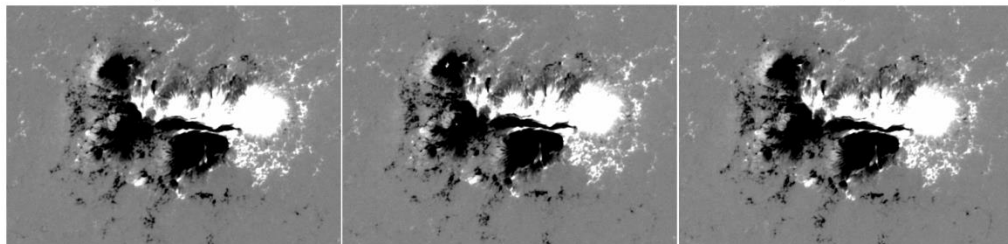
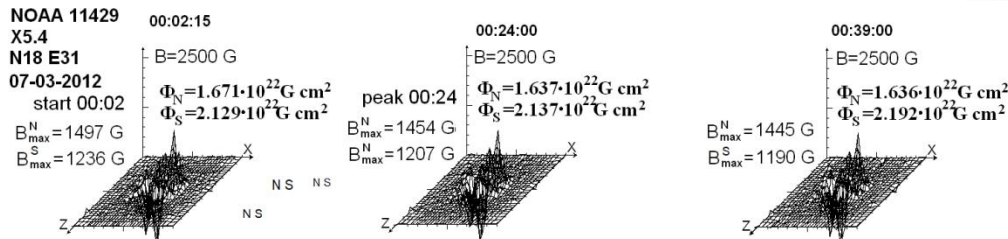
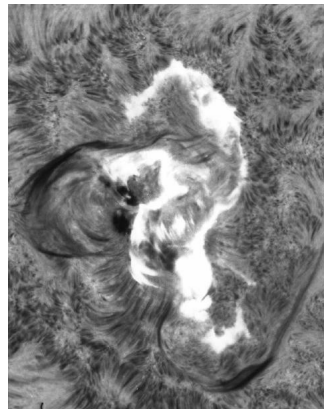
**Спасибо за
внимание!**

Наблюдательные доказательства появления вспышек в короне на высотах 15 000 – 30000 км.

Тепловое рентгеновское излучение вспышки

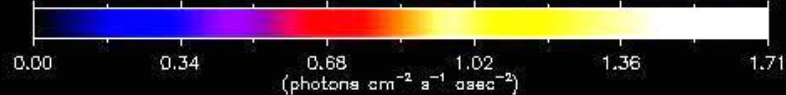


Вспышечные ленты H_{α}

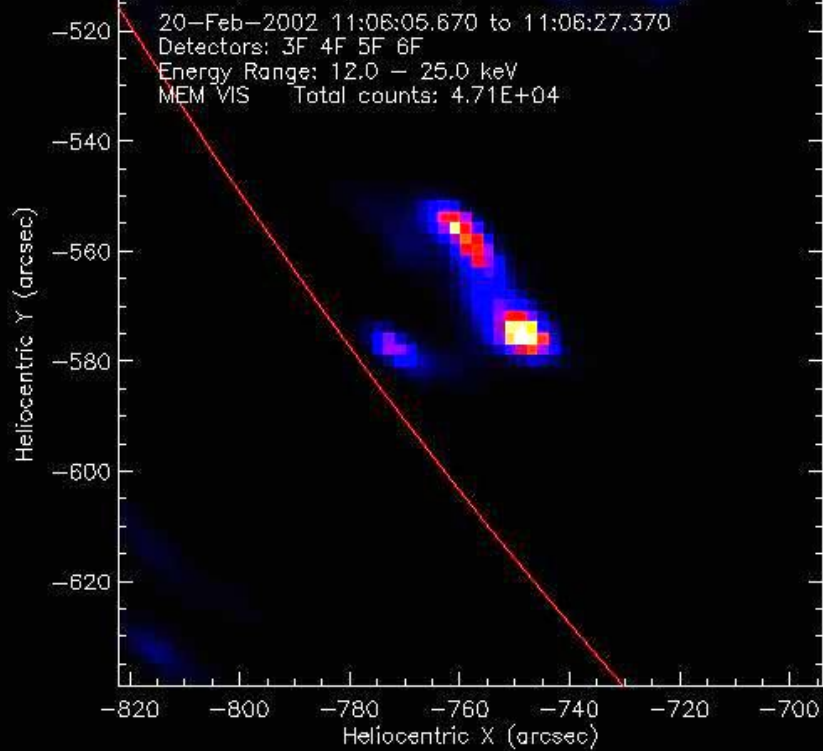


Магнитограммы и ультрафиолетовое излучение вспышки

Постоянство компоненты магнитного поля вдоль луча зрения, нормальной компоненты и магнитного потока на солнечной поверхности во время вспышки. Подгорный, Подгорный, Мешалкина. АЖ. 92, 669, 2015.

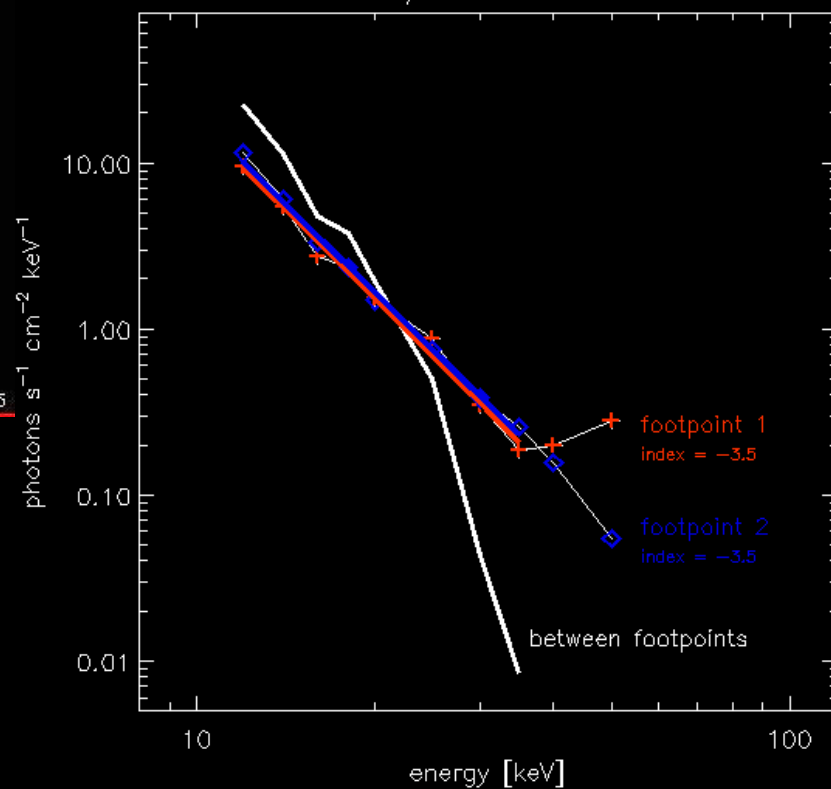


Reconstructed HESSI Image

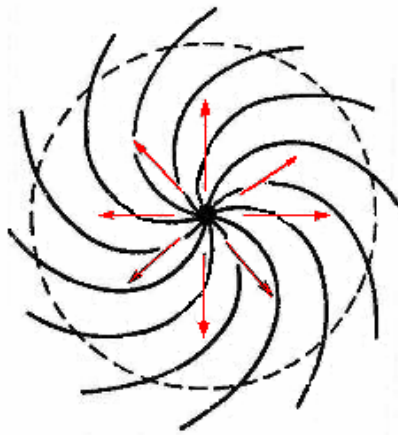


9-Apr-2002 19:35

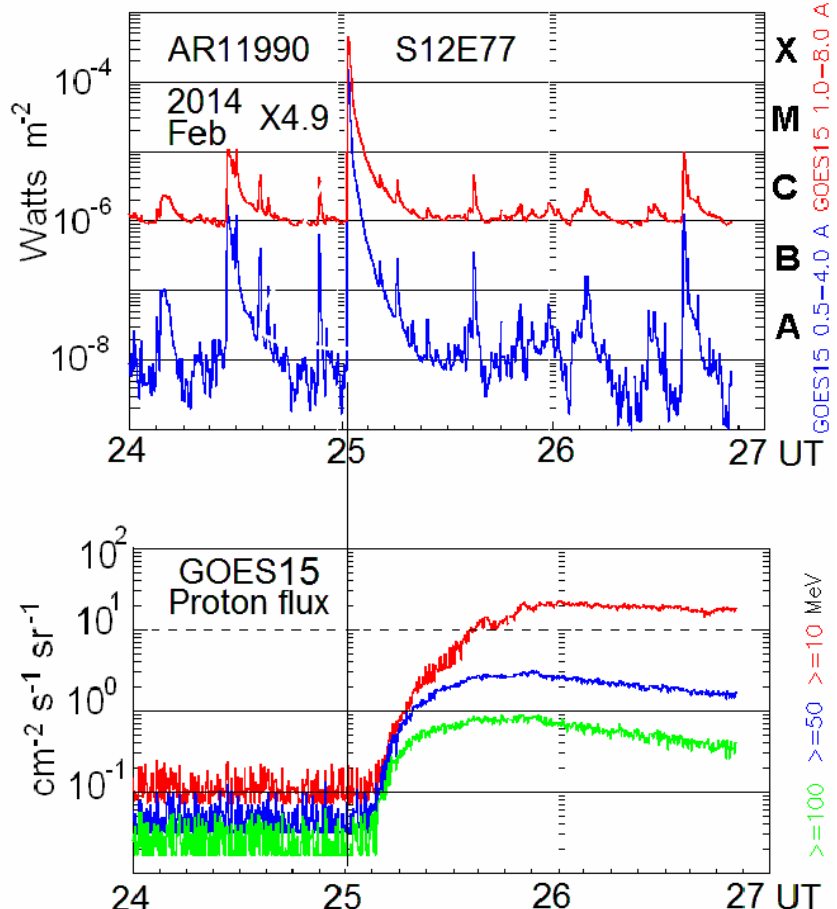
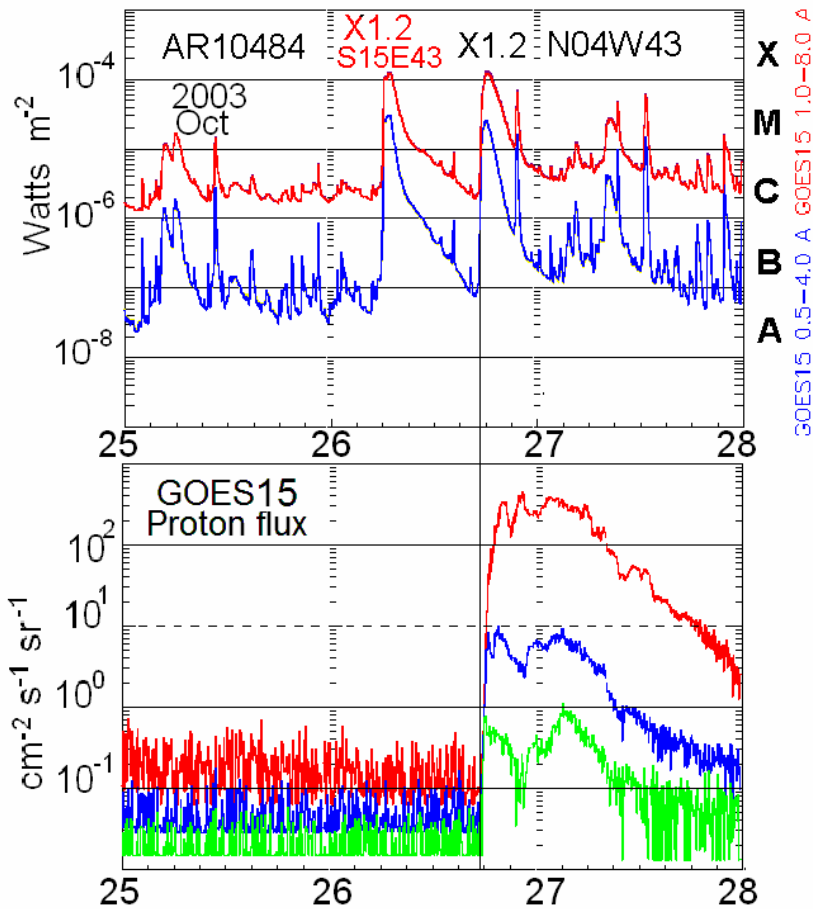
2002 02 20, 11:06:00 - 11:06:40



Не все вспышки сопровождаются появлением солнечных космических лучей. Только 30% наиболее мощных вспышек (класса X) вызывают появление СКЛ. Согласно нашим представлениям, заряженные частицы всегда ускоряются в месте первичного вспышечного освобождения энергии в солнечной короне, но не всегда они смогут выйти из конфигурации магнитного поля над активной областью.



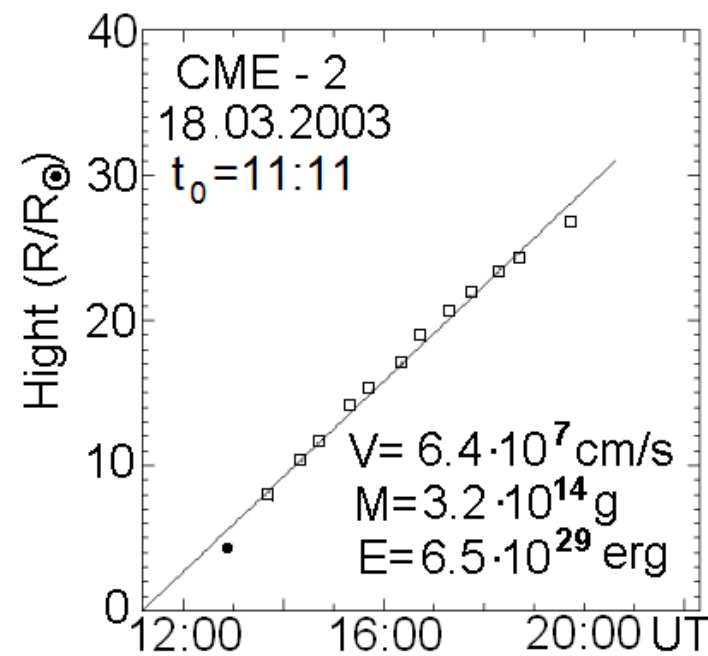
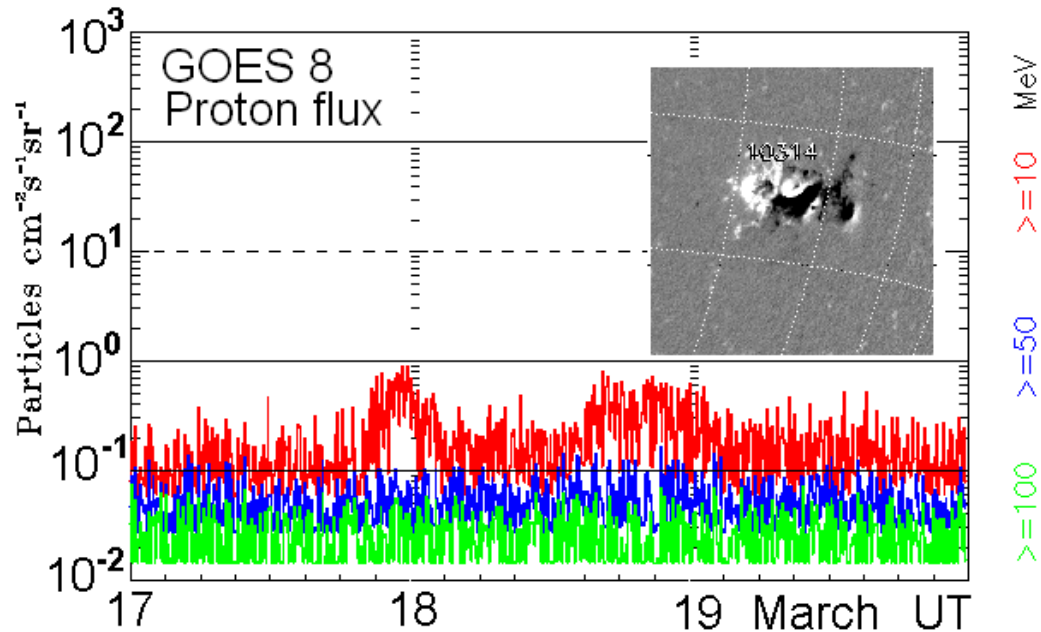
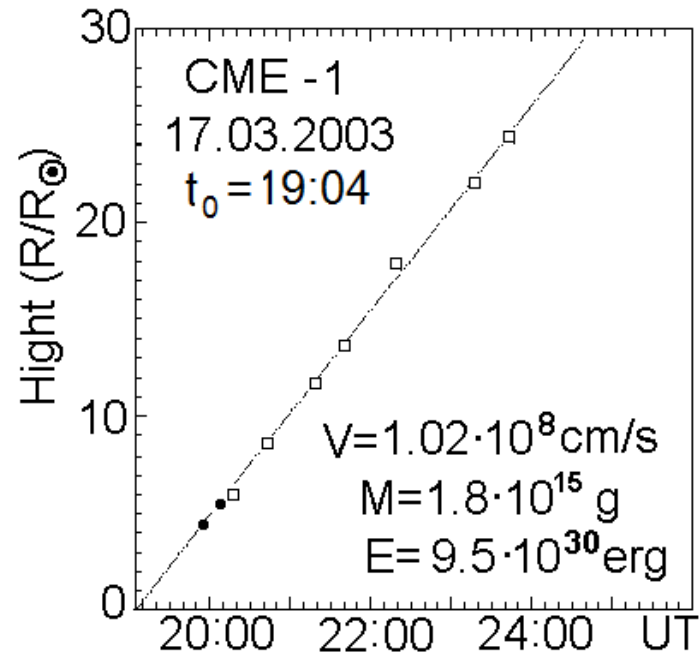
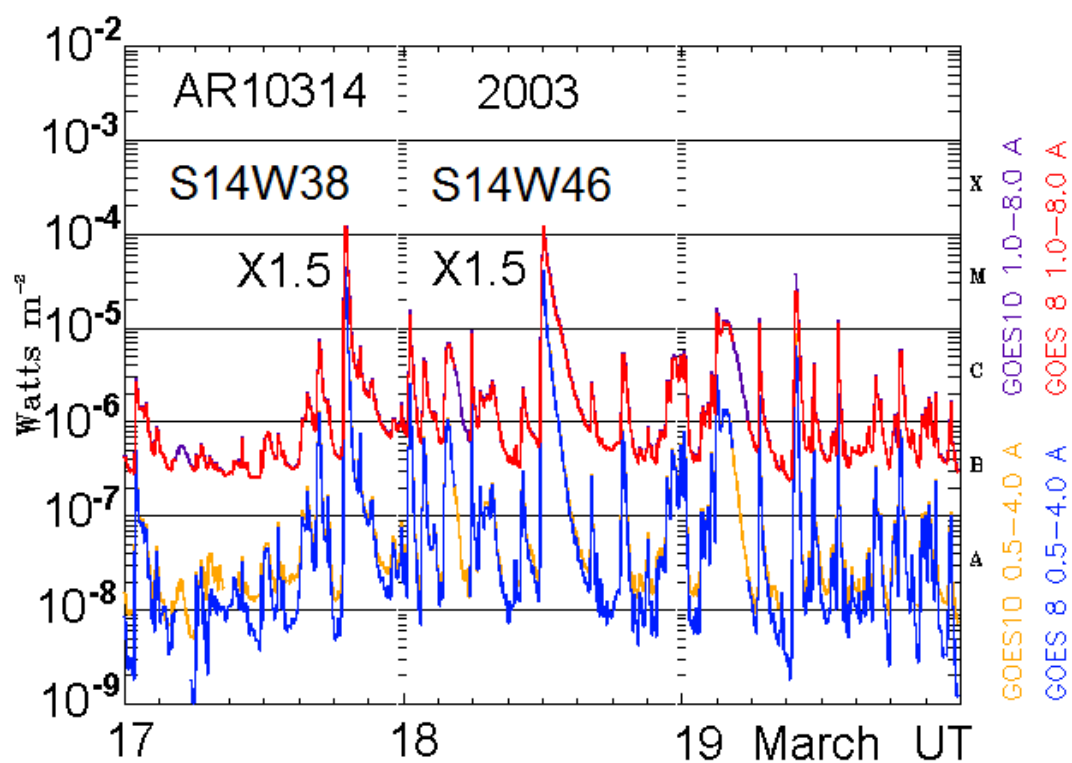
Солнечный ветер -
расширение в вакуум
плазмы в магнитном
поле при
 $8\pi nW/B^2 > 1$.

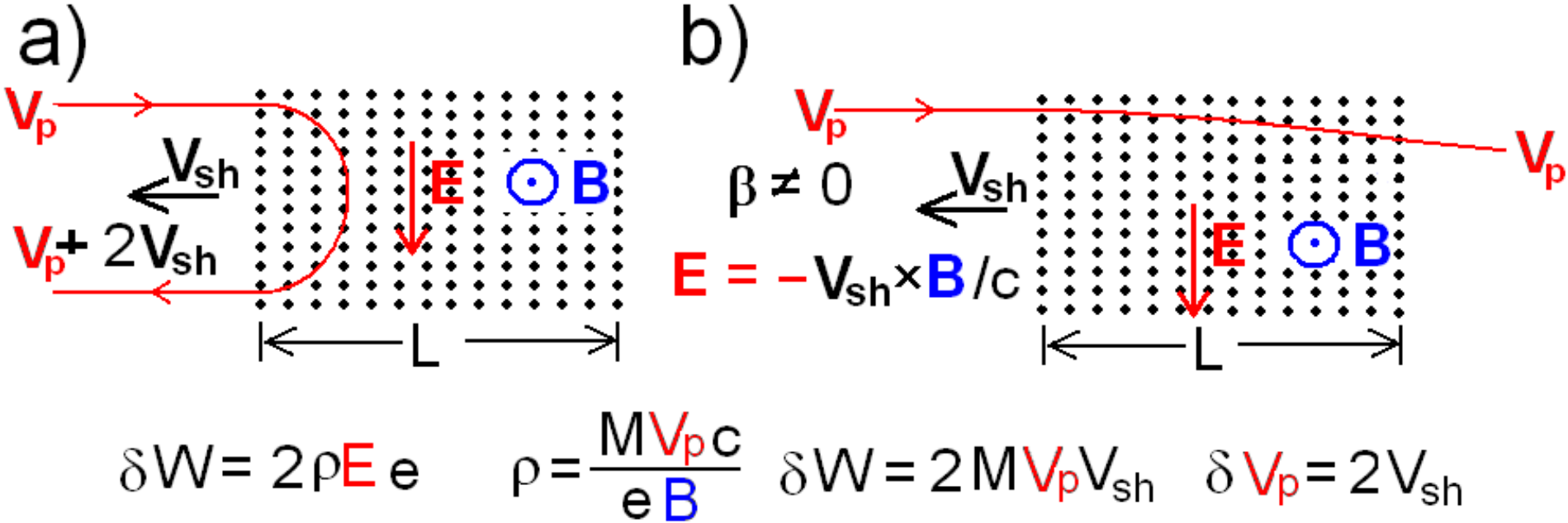


X
M
C
B
A
GOES15 0.5-4.0 A GOES15 1.0-8.0 A

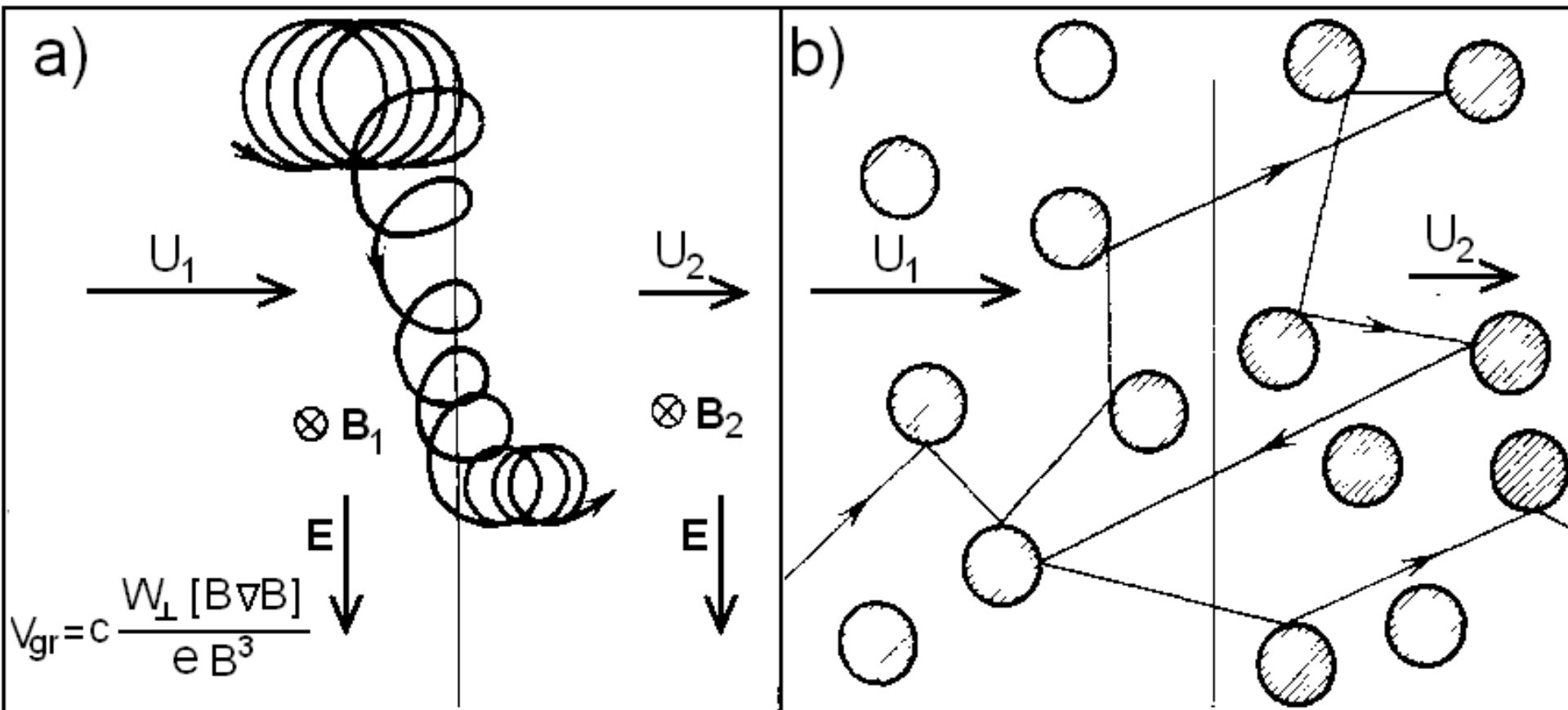
X
M
C
B
A
GOES15 0.5-4.0 A GOES15 1.0-8.0 A

>=100
>=50
>=10 MeV

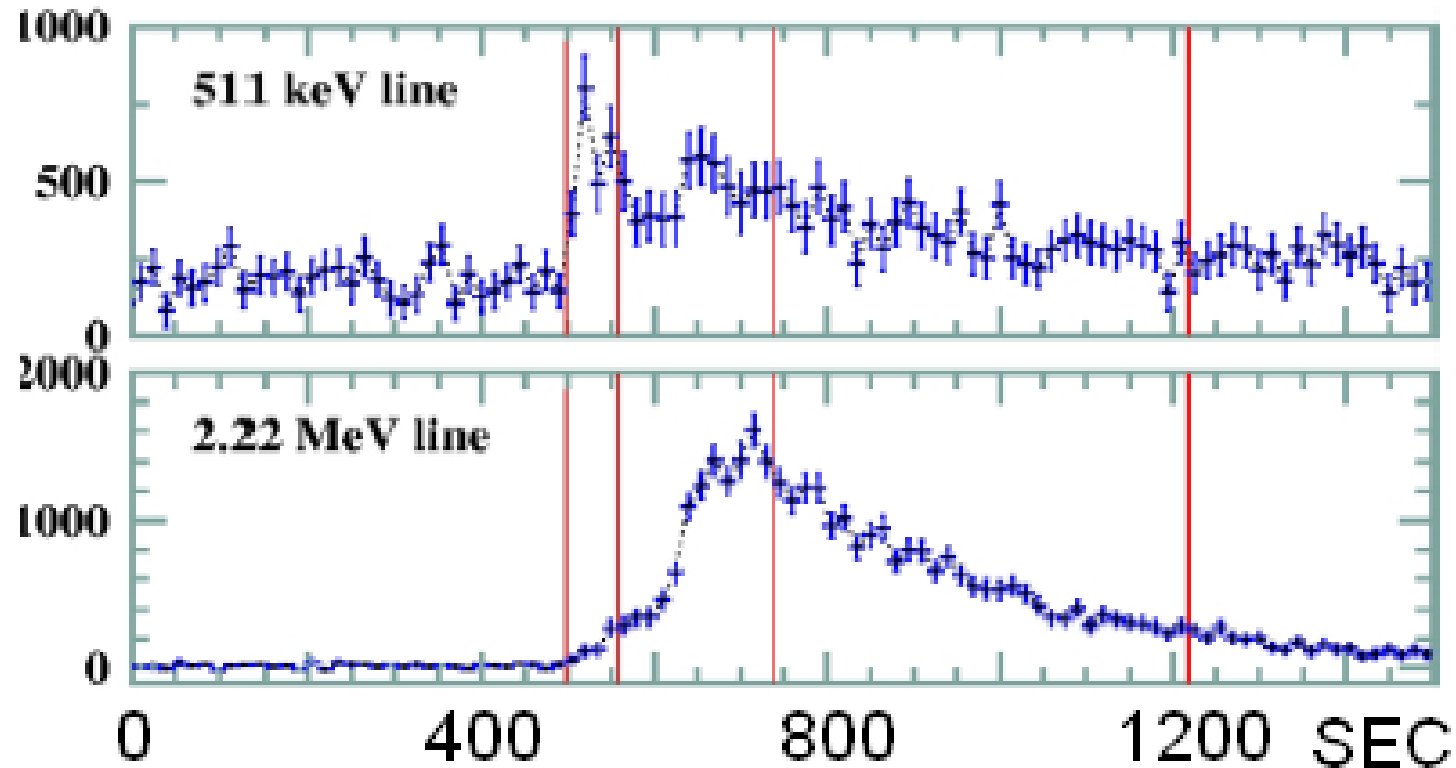
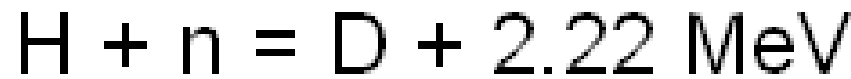




Для Ферми ускорения частицы необходимо, чтобы размер магнитного облака (толщина ударной волны) L превосходил ларморовский радиус частицы ρ . В противном случае частица пронизывает магнитное облако. Максимально достижимая энергия соответствует равенству ларморовского радиуса $\rho \sim W/300B$ размеру магнитного облака. При магнитном поле в ударной волне $B = 5 \times 10^{-4}$ Г для ускорения до 2×10^9 эВ необходима ширина фронта волны большая $\sim 10^{10}$ см. Скопление таких неоднородностей в солнечном ветре никогда не наблюдалось.



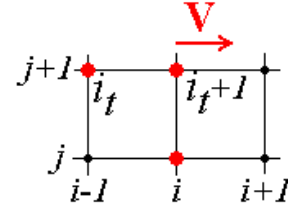
INTEGRAL October, 28. 2003.



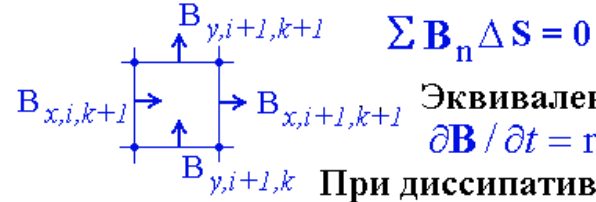
Длительность ядерных реакций на Солнце и рентгеновского излучения практически одинаковы, но в 100 раз меньше длительности регистрируемого потока протонов.

В программе ПЕРЕСВЕТ:

- Противопоточная для диагональных членов, конечно-разностная схема.
- Схема абсолютно неявная, решается методом итераций (не обязательно $\Delta t V_w / \Delta x < 1$).
- Схема консервативна относительно магнитного потока $[\text{div} \mathbf{B}] = 0$



$$\mathbf{u}_i^{(i_t+1)j+1} = \mathbf{u}_i^j - \mathbf{v} \frac{\Delta t}{\Delta x} (\mathbf{u}_i^{(i_t+1)j+1} - \mathbf{u}_{i-1}^{(i_t)j+1})$$

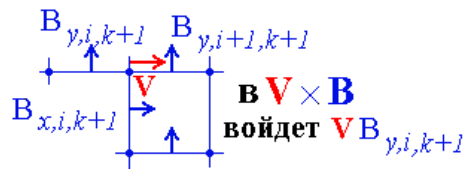


Эквивалентность уравнений

$$\partial \mathbf{B} / \partial t = \text{rot}(\mathbf{V} \times \mathbf{B}) + v_m \Delta \mathbf{B} \quad \text{и} \quad \partial \mathbf{B} / \partial t = \text{rot}(\mathbf{V} \times \mathbf{B}) - v_m \text{rot}(\text{rot} \mathbf{B})$$

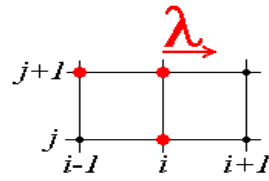
При диссипативной релаксации магнитно поля плотность тока $[\text{rot} \mathbf{B}] \rightarrow 0$

- Несимметричная (противопоточная) аппроксимация $\mathbf{V} \times \mathbf{B}$.



Другие методы:

- Явные конечно-разностные схемы
- Часто типа Годунова (волны Римана)
- Используем специальные методы повышения порядка аппроксимации (FCT, TVD)
- Так же Лагранжевы схемы с пересчетом путем интерполяции на каждом шаге



$$\mathbf{w}_i^{j+1} = \mathbf{w}_i^j - \lambda \frac{\Delta t}{\Delta x} (\mathbf{w}_i^j - \mathbf{w}_{i-1}^j)$$

- Некоторые схемы также консервативны относительно магнитного потока $[\text{div} \mathbf{B}] = 0$, но с симметричной аппроксимацией $\mathbf{V} \times \mathbf{B}$.

В $\mathbf{V} \times \mathbf{B}$ войдет $\mathbf{v} (B_{y,i+1,k+1} + B_{y,i,k+1}) / 2$

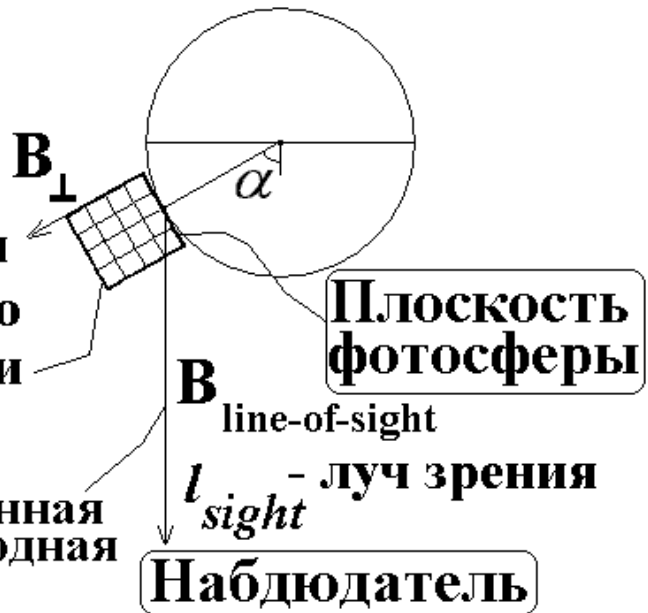
Начальное потенциальное магнитное поле

$$\mathbf{B} = \nabla \varphi_m$$

$\Delta \varphi_m = 0$ решается используя конечно-разностную схему в области

Граничное условие на плоскости фотосферы:

$$\frac{\partial \varphi_m}{\partial l_{sight}} = \mathbf{B}_{\text{line-of-sight}} - \text{наклонная производная}$$



На сетке, соответствующей консервативной относительно магнитного потока конечно-разностной схеме решения МГД уравнений

$$[\text{rot}]\mathbf{B}=0 \quad [\text{div}]\mathbf{B}=0$$

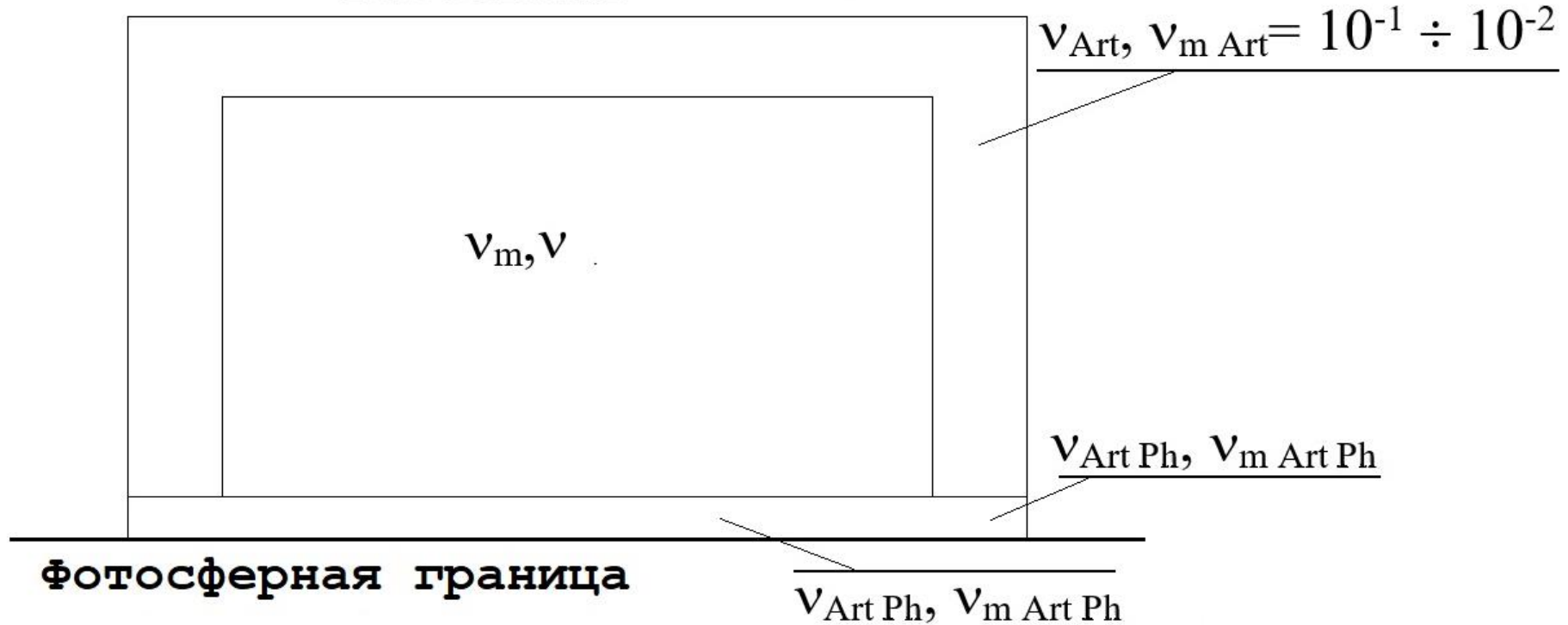
2 метода решения $\Delta \varphi_m = 0$:

1. $\Delta \varphi_m = 0$ непосредственно итерациями

2. Релаксацией диффузионного уравнения $\frac{\partial \varphi_m}{\partial t} = \Delta \varphi_m$

Стабилизация неустойчивости на границе, которая появляется особенно часто при малой вязкости в области (магнитной и обычной) требует малых шагов и большого количества итераций.

Расчетная область

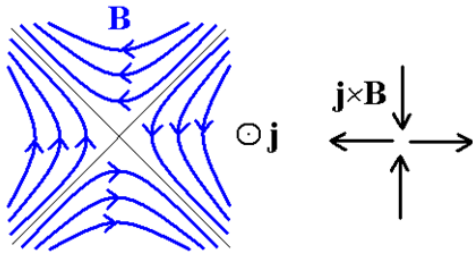


Два расчета с наборами параметров:

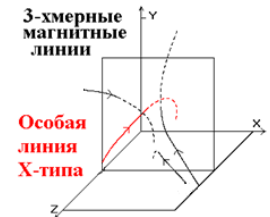
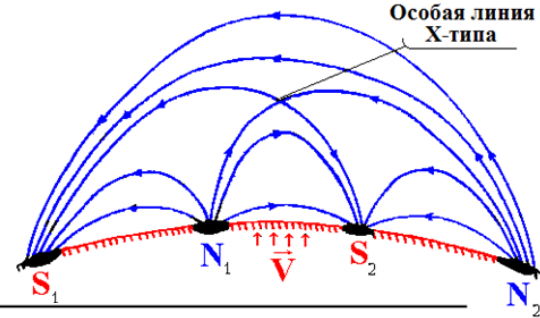
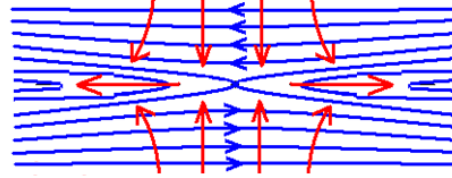
1. $v_m = 0.3 \times 10^{-5}$ ($Rm = 3 \times 10^5$); $v = 10^{-4}$ ($Re = 10^4$); $v_{Art Ph}, v_{m Art Ph} = 0.3 \times 10^{-2}$
2. $v_m = 10^{-9}$ ($Rm = 10^9$); $v = 10^{-7}$ ($Re = 10^7$); $v_{Art Ph}, v_{m Art Ph} = 10^{-4}$

(В солнечной короне $Rm = 10^{16}$, $Re = 10^4$, $Re_B = 10^{20}$; сеточная вязкость $v_{grid} = h V_{DimLess}$; $h = 0.5 \times 10^{-2}$; $V_{DimLess} = 10^{-6} \div 10^{-3}$; $a = v_m / V_{in}$)

Flare mechanisms

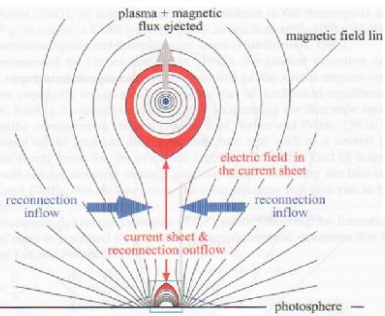


С. И. Сыроватский 1966
A. Bratenahl, W. Hirsch 1966

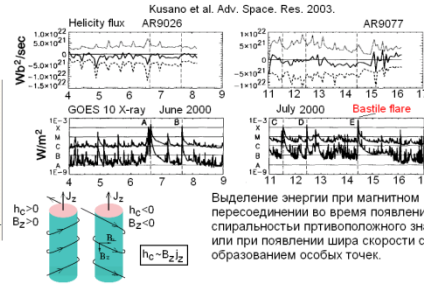
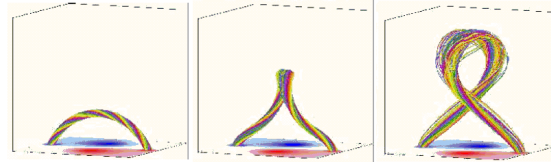


CME-FLARE ASSOCIATION DEDUCED FROM CATASTROPHIC MODEL OF CMES

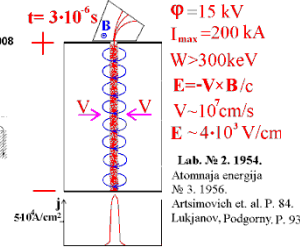
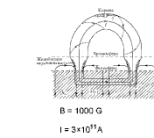
Lin 2004



T. TÖRÖK AND B. KLIEM 2005



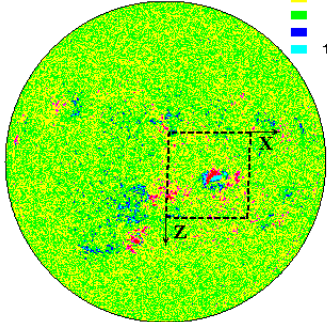
А. Б. Северный 1964
В. В. Зайцев УФН - 2008
А. В. Северный



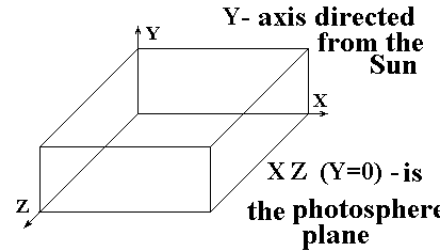
Now our aim is: To find solar flare mechanism directly by MHD simulation in real active region.

27-05-2003 20:47:59
fd_H_96m_01d.3789_0013.fits
B_0 = -1.1810

B IN GAUSSSES
B < -150
-150 < B < -50
-50 < B < 0
0 < B < 50
50 < B < 150
150 < B



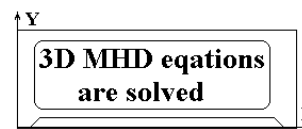
COMPUTATIONAL DOMAIN IN CORONA ABOVE ACTIVE REGION



Photospheric boundary:

$B_{||}$ from calculated potential field for observed $B_{\text{line-of-site}}$
 B_{\perp} from $\text{div}B = 0$;
 $\rho = \text{const}; \partial V / \partial n = 0; \partial T / \partial n = 0$

Cross-section $Z = \text{const}$

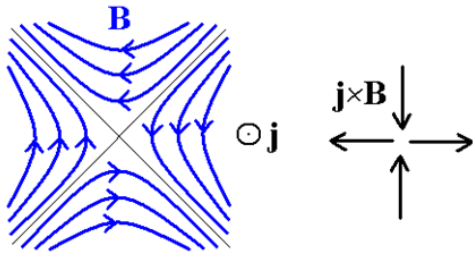


Nonphotospheric boundary:

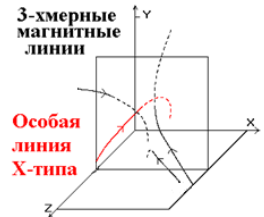
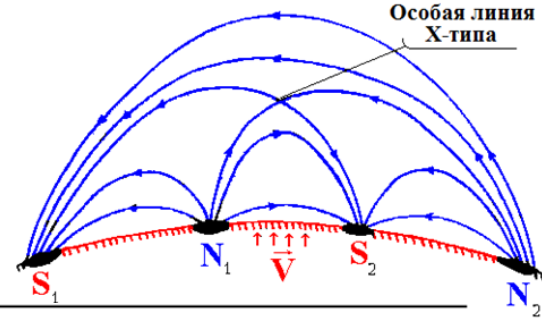
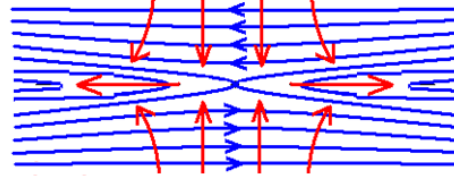
B_{\perp} from $\text{div}B = 0$
 $B_{||}$ from $\partial j / \partial n = 0$
 $\partial \rho / \partial n = 0$
 $\partial V / \partial n = 0$
 $\partial T / \partial n = 0$

Earlier: Hypothesized the mechanism of the solar flare, which is then tested.

Flare mechanisms

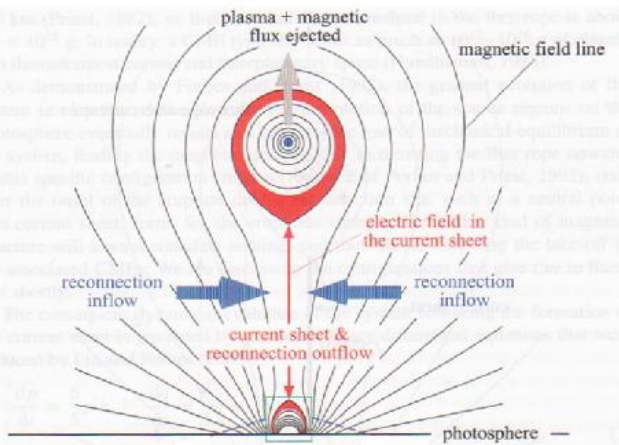


С. И. Сыроватский 1966
A. Bratenahl, W. Hirsch 1966

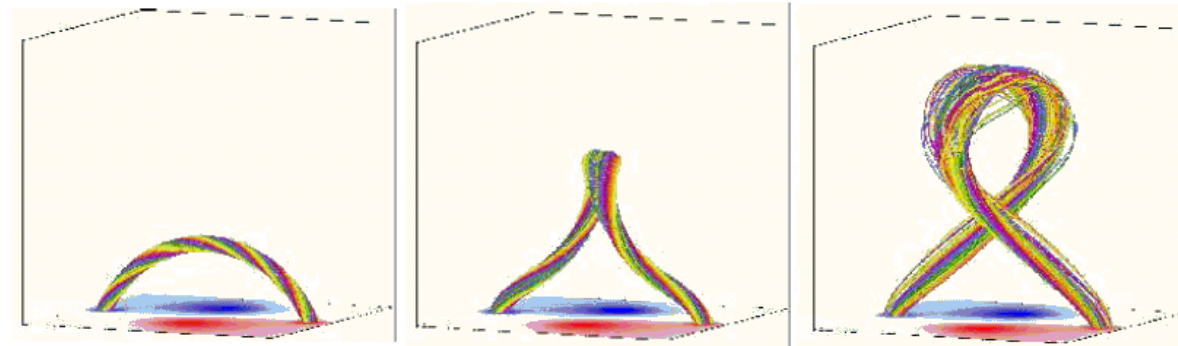


CME-FLARE ASSOCIATION DEDUCED FROM CATASTROPHIC MODEL OF CMES

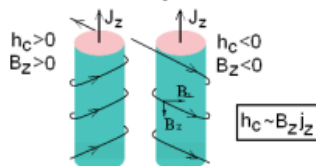
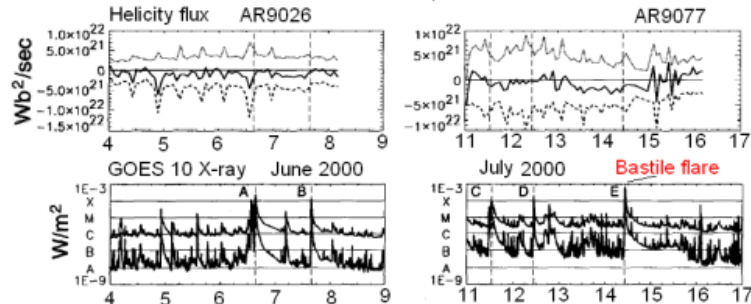
Lin 2004



T. TÖRÖK AND B. KLIEM 2005



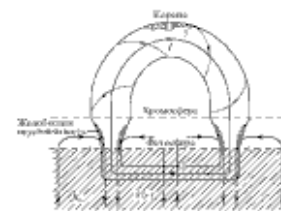
Kusano et al. Adv. Space. Res. 2003.



Выделение энергии при магнитном пересоединении во время появления спиральности противоположного знака или при появлении шира скорости с образованием особых точек.

А. Б. Северный 1964

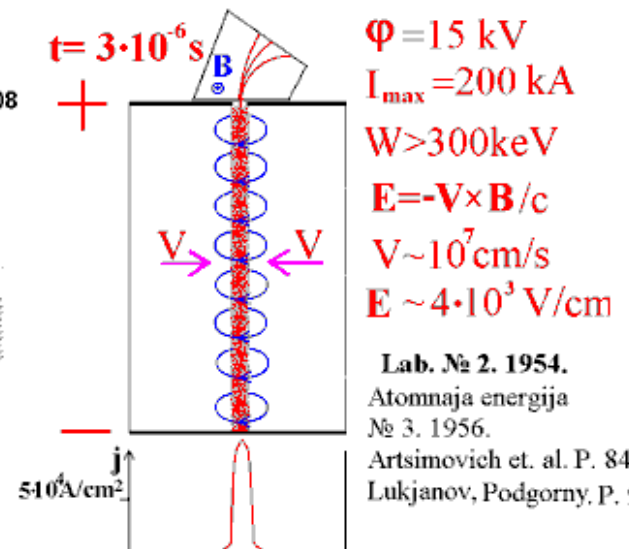
В. В. Зайцев
А. В. Северный
УФН - 2008



B = 1000 G

I = 3 * 10^11 A

$t = 3 \cdot 10^{-6} \text{ s}$



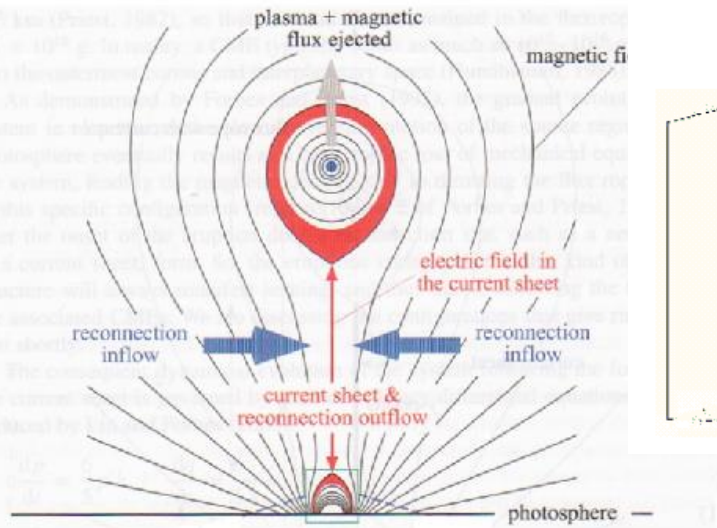
$\Phi = 15 \text{ kV}$
 $I_{\text{max}} = 200 \text{ kA}$
 $W > 300 \text{ keV}$
 $E = -V \times B / c$
 $V \sim 10^7 \text{ cm/s}$
 $E \sim 4 \cdot 10^3 \text{ V/cm}$

Lab. № 2. 1954.
Atomnaja energija
№ 3. 1956.
Artsimovich et. al. P. 84.
Lukjanov, Podgorny, P. 93.

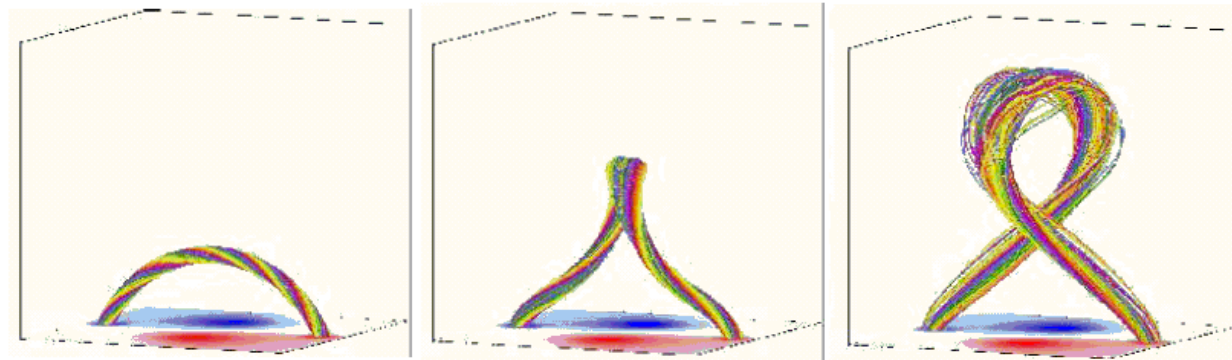
Examples of alternative models of the solar flare

CME-FLARE ASSOCIATION DEDUCED FROM CATASTROPHIC MODEL OF CMES

Lin 2004



T. TÖRÖK AND B. KLIEM 2005



It is unclear how the rope can appear due to real disturbances on the photosphere.

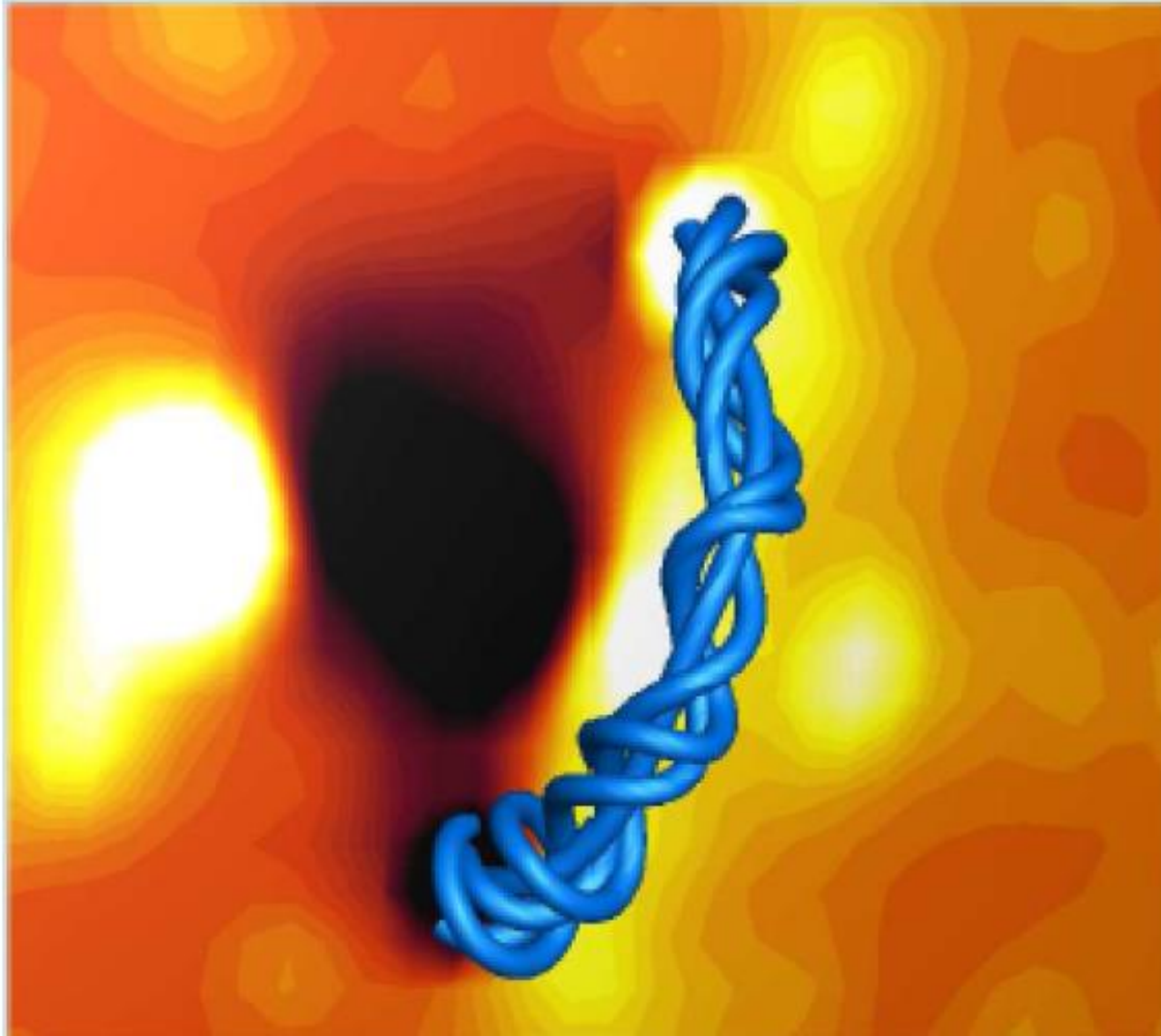
In any case to verify the validity of these models it is necessary to perform presented here MHD simulations for real active region.

Initiation of CMEs:

- Unstable magnetic structure.

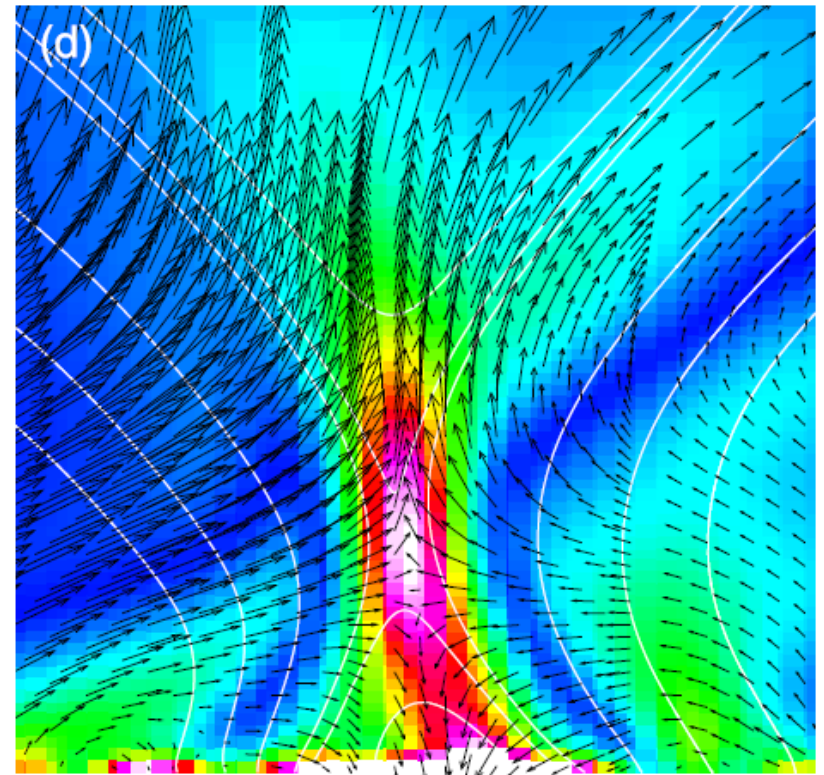
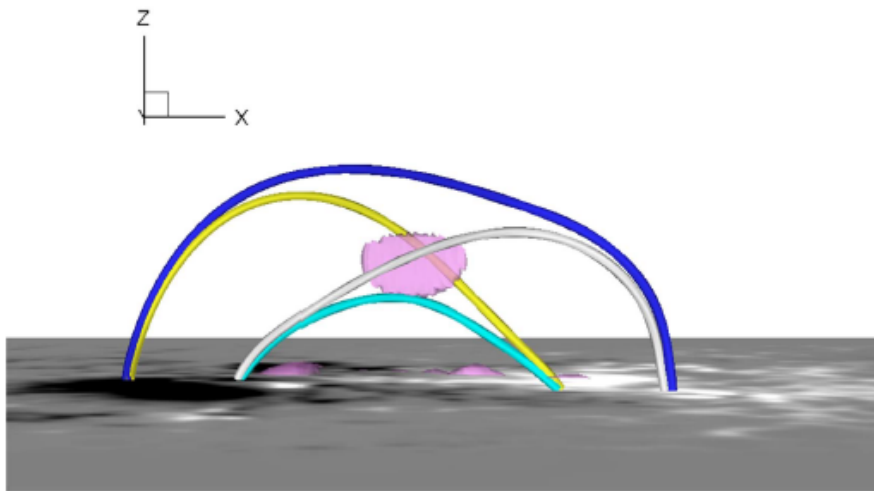
Lugaz et al. 2011, ApJ

Demoulin and Titov



Jiang, C., Wu, S.T., Yurchyshyn, V., Wang, H., Feng, X., Hu, Q. 2016

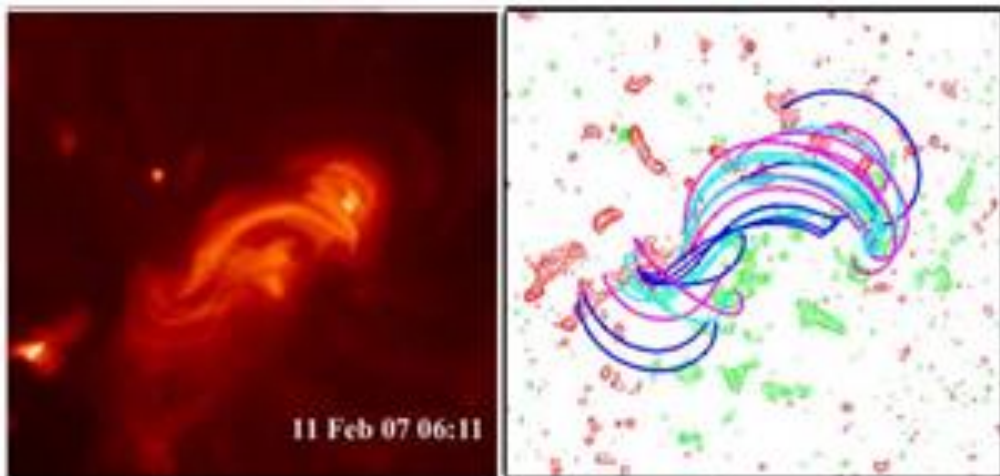
2014 October 24 21:00 UT
AR 12192 X3.1



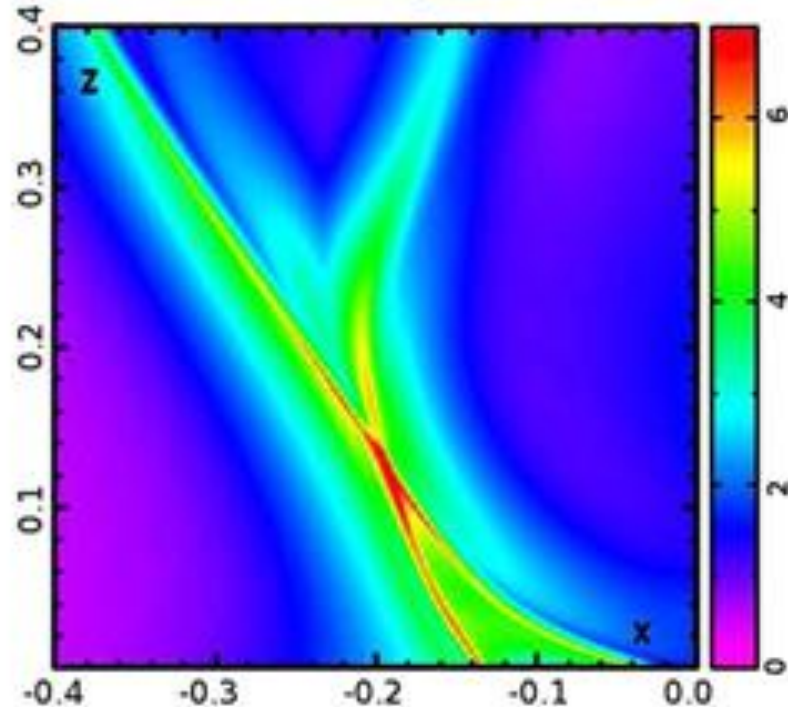
J/B 0 0.1 0.2 0.3

Вычисления магнитных полей в короне над активной областью в **бессиловом** приближении ($\text{rot}\mathbf{V}=\alpha\mathbf{V}$).

SAVCHEVA, VAN BALLEGOOIJEN, DeLUCA, APJ 744:78, 2012



Savcheva et al. ApJ, 750:15, 2012



Decipher the Three-Dimensional Magnetic Topology of a Great Solar Flare

February 9, 2018

Chaowei Jiang, Peng Zou, Xueshang Feng, Qiang Hu, Aiyong Duan, Pingbing Zuo, Yi Wang, Fengsi Wei

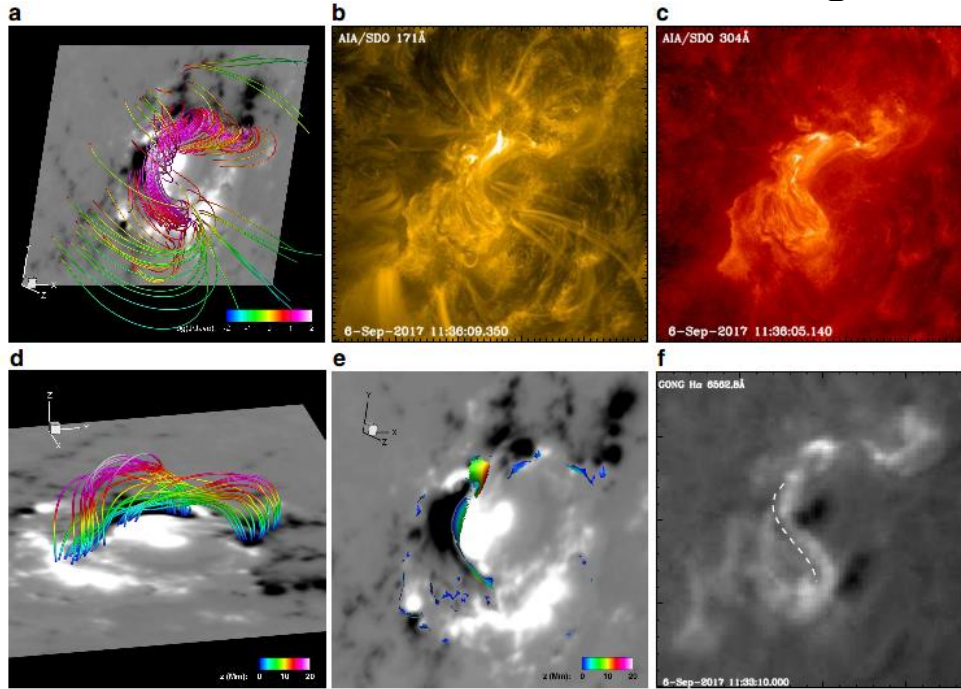


Figure 2: Comparison of the reconstructed magnetic field with the observed features of the solar corona prior to the flare. (a) SDO view of sampled magnetic field lines of the NLFFF reconstruction. The color of the lines represents the value of current density J (normalized by its average value J_{ave} in the computational volume). The background is the photospheric magnetogram. (b) and (c) SDO/AIA 171 Å and 304 Å images of the pre-flare corona. (d) The low-lying magnetic field lines in the core region. The field lines are color-coded by the value of height z . (e) Locations of dips in the magnetic field lines, and the color indicates the value of height z . (f) GONG H α image of the AR. The dashed curve denotes the location of a long filament.

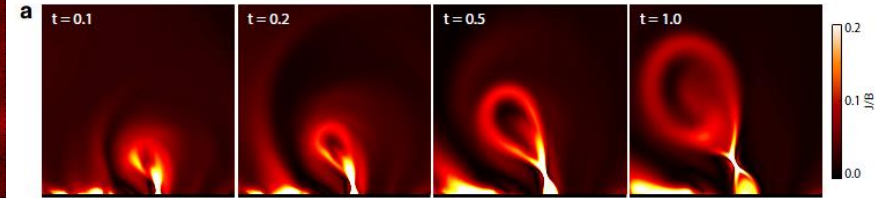
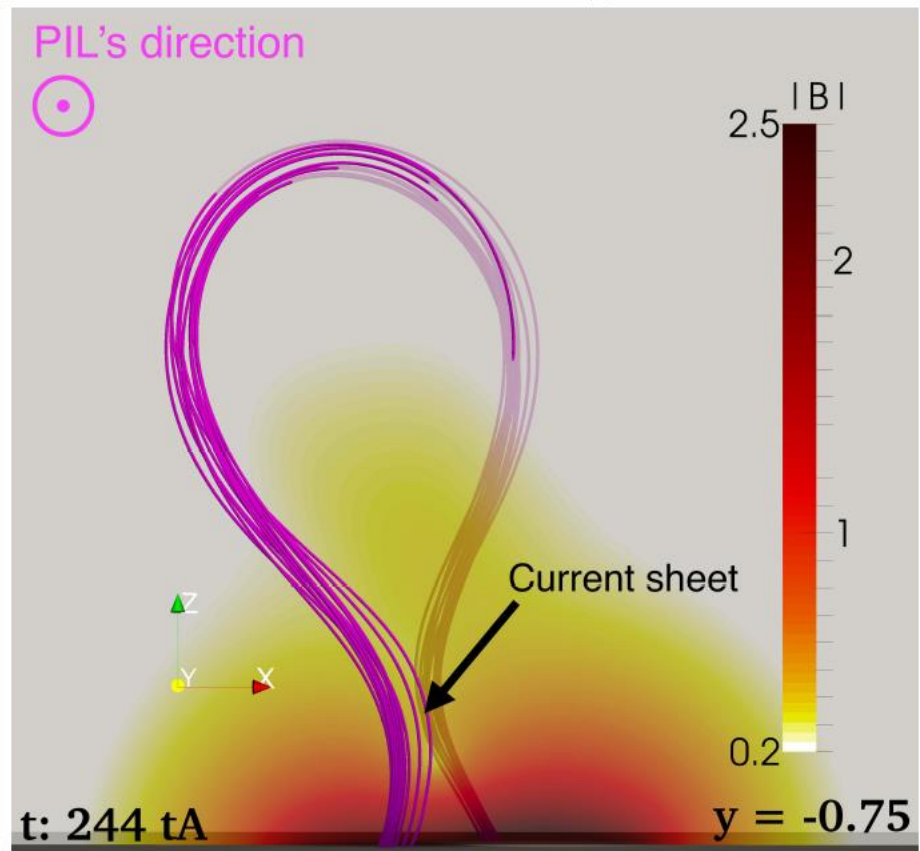
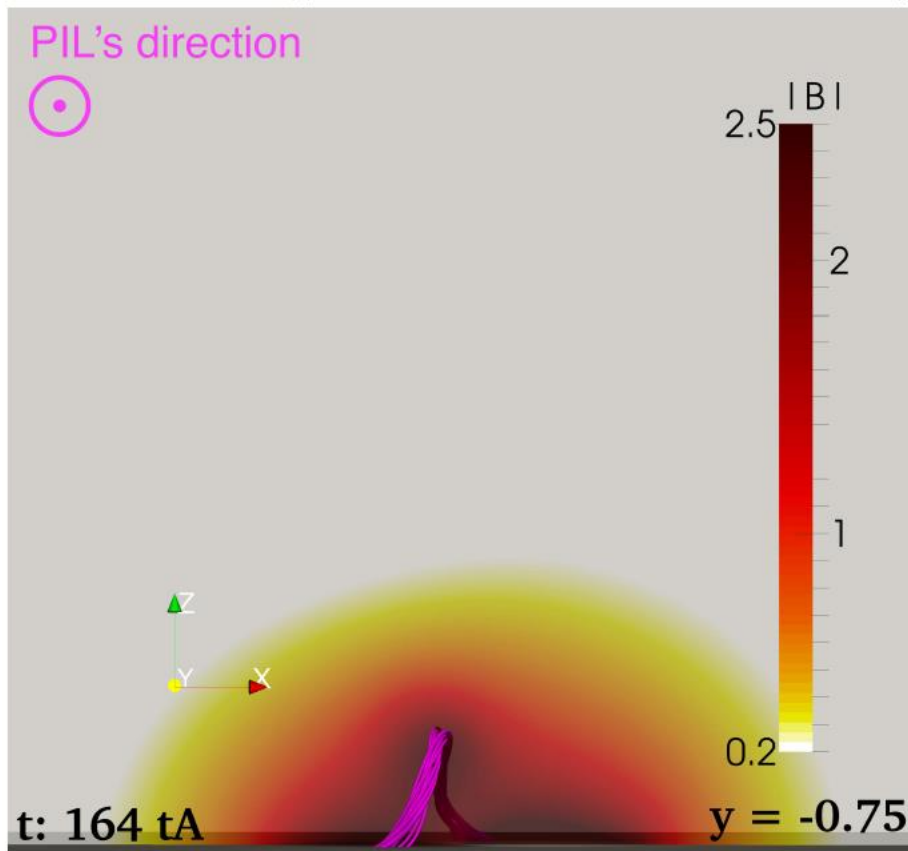
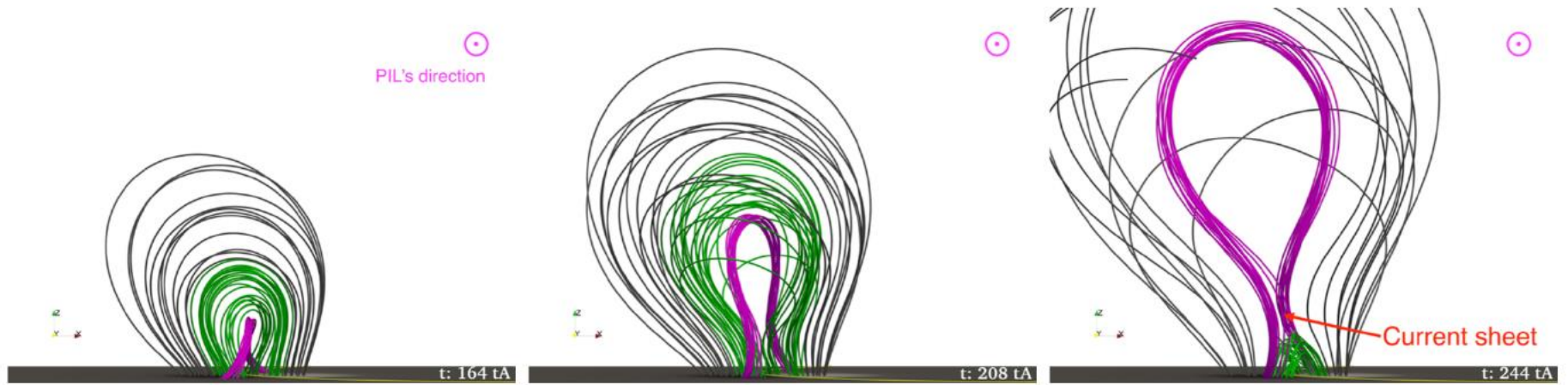
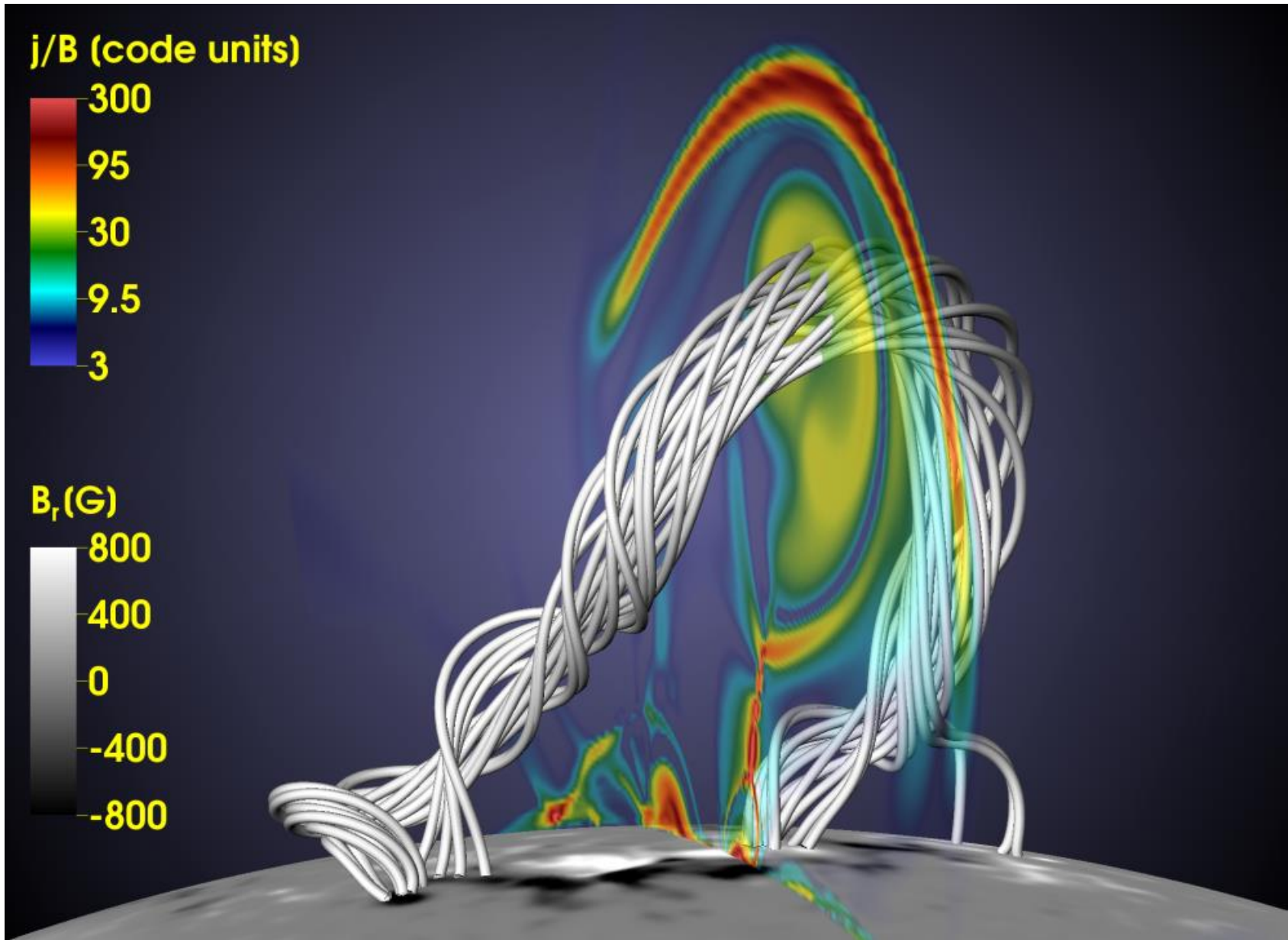


Figure 4: Temporal evolution of the eruptive structure in 2D view. Distribution of current density on the vertical cross section (the $y = 0$ plane). Here the current density is normalized by local magnetic field strength, which provides a high contrast of thin current layers with other volumetric currents.

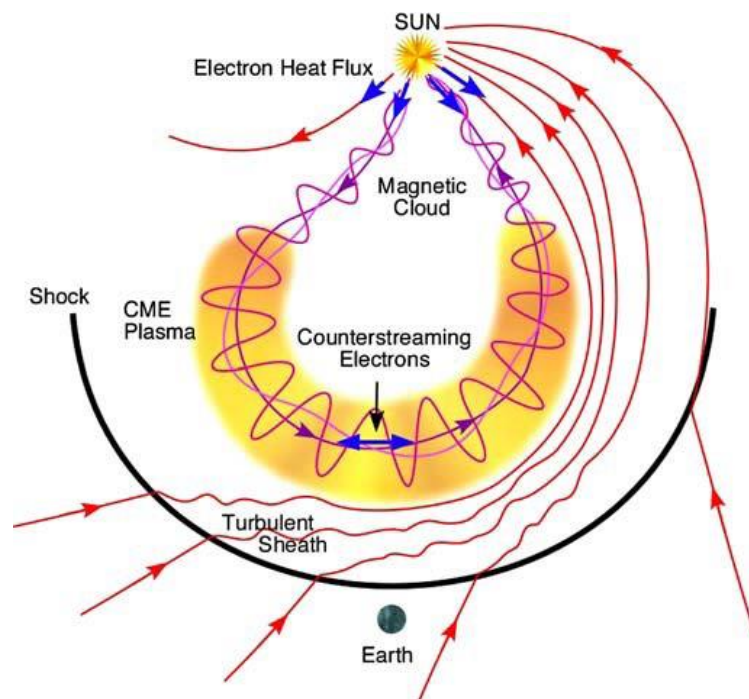


Sun-to-Earth Modeling of Powerful CMEs (& Future SW Forecast)

T. Török, C. Downs, J.A. Linker, R. Lionello, V.S. Titov, P. Riley, Z. Mikić, R. Caplan, J. Wijaya

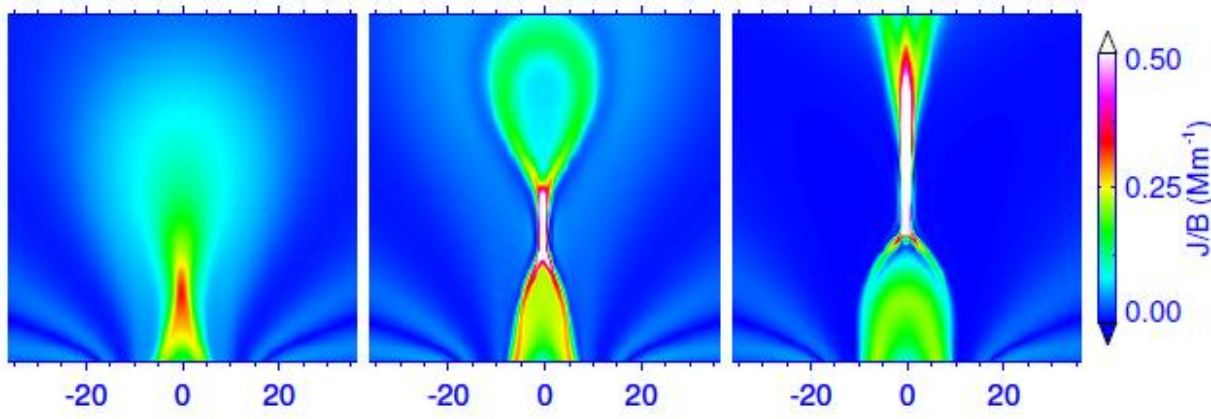
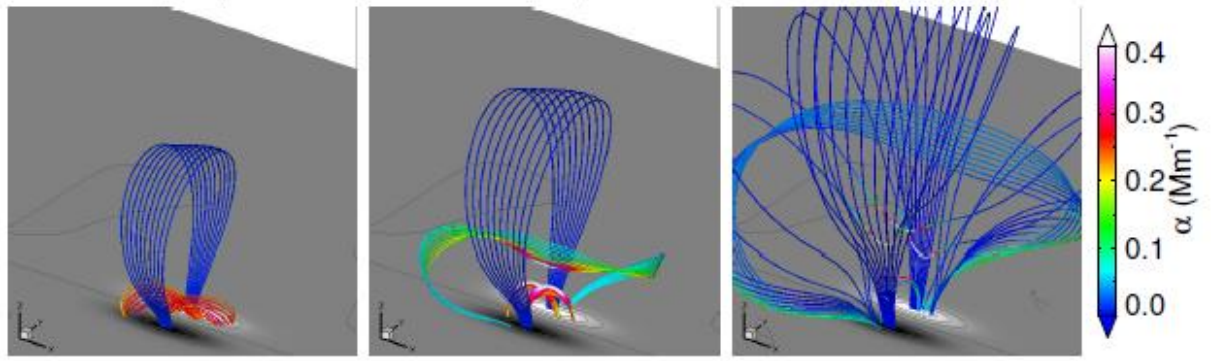
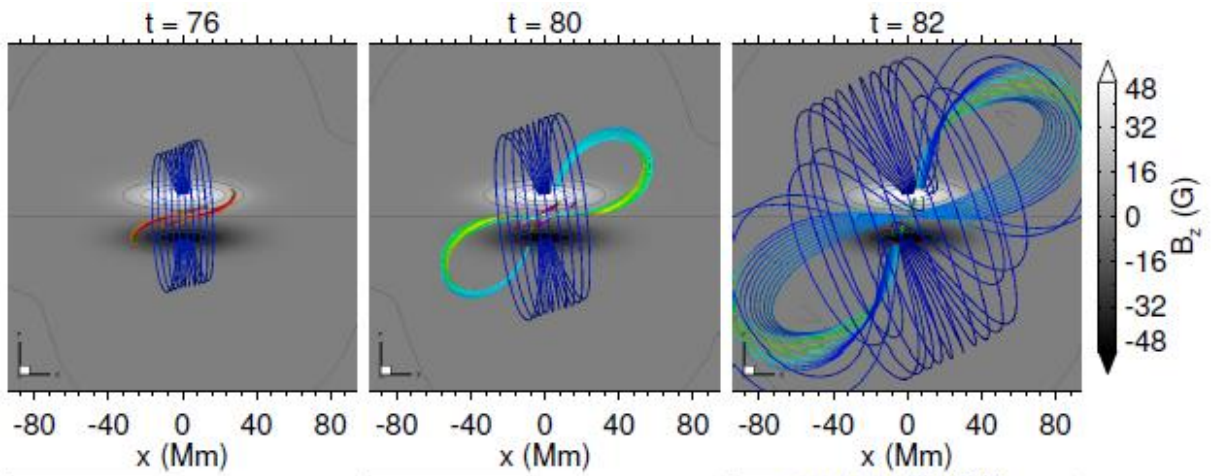


Dumbovic M. Utilizing galactic cosmic rays to understand the Sun-to-Earth evolution of CMEs. VarSITI Symposium. София, Болгария. июнь, 2019



Из доклада Матеи Думбовик: По измерениям на спутниках магнитное поле в 70% выбросов не имеет скрученной структуры.

(Жгут не появляется)



Numerical Simulation of a Fundamental Mechanism of Solar Eruption with Different Magnetic Flux Distributions

X. Bian, C. Jiang,
 X. Feng, P. Zuo,
 Yi Wang, X. Wang

2021

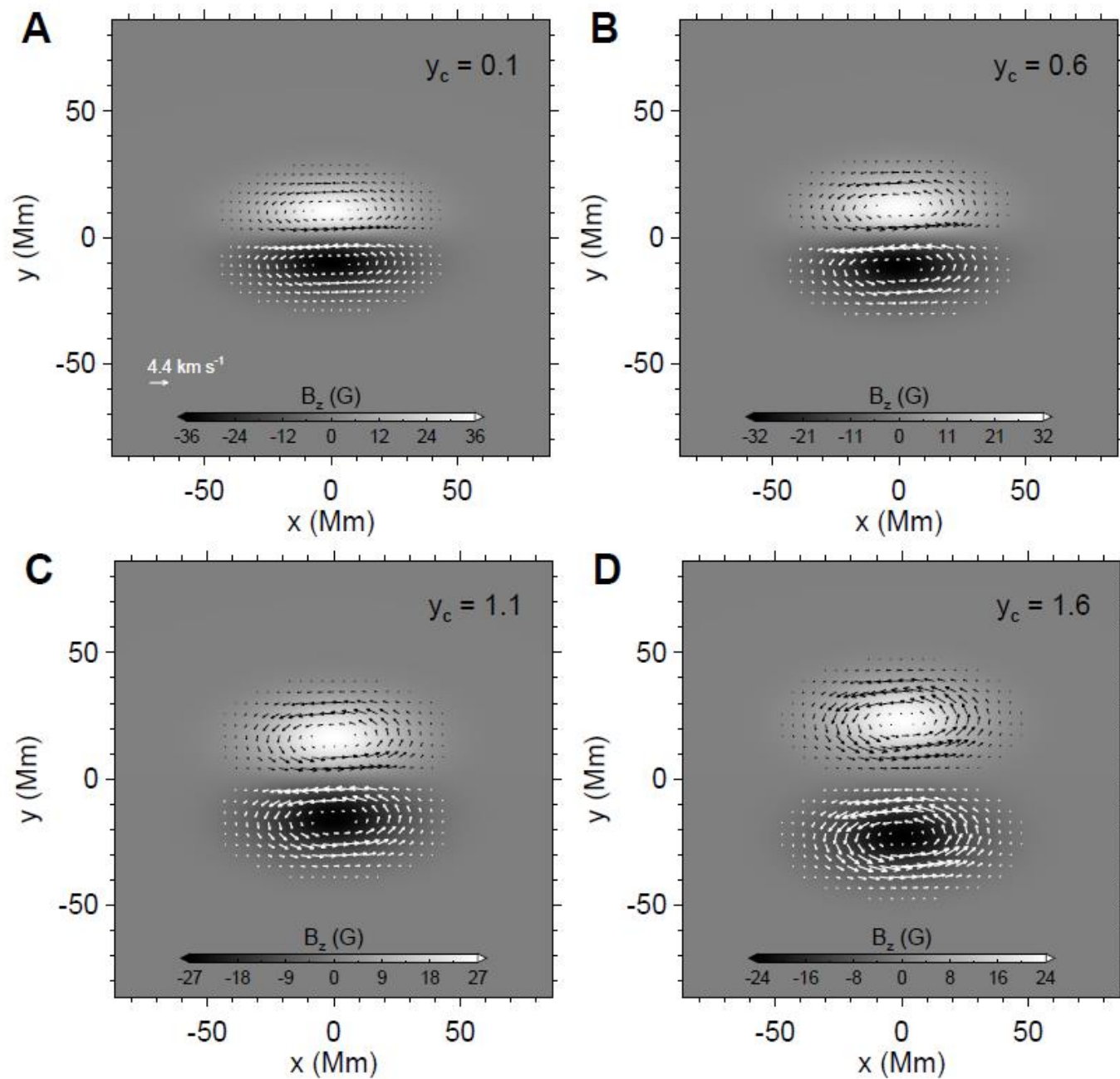
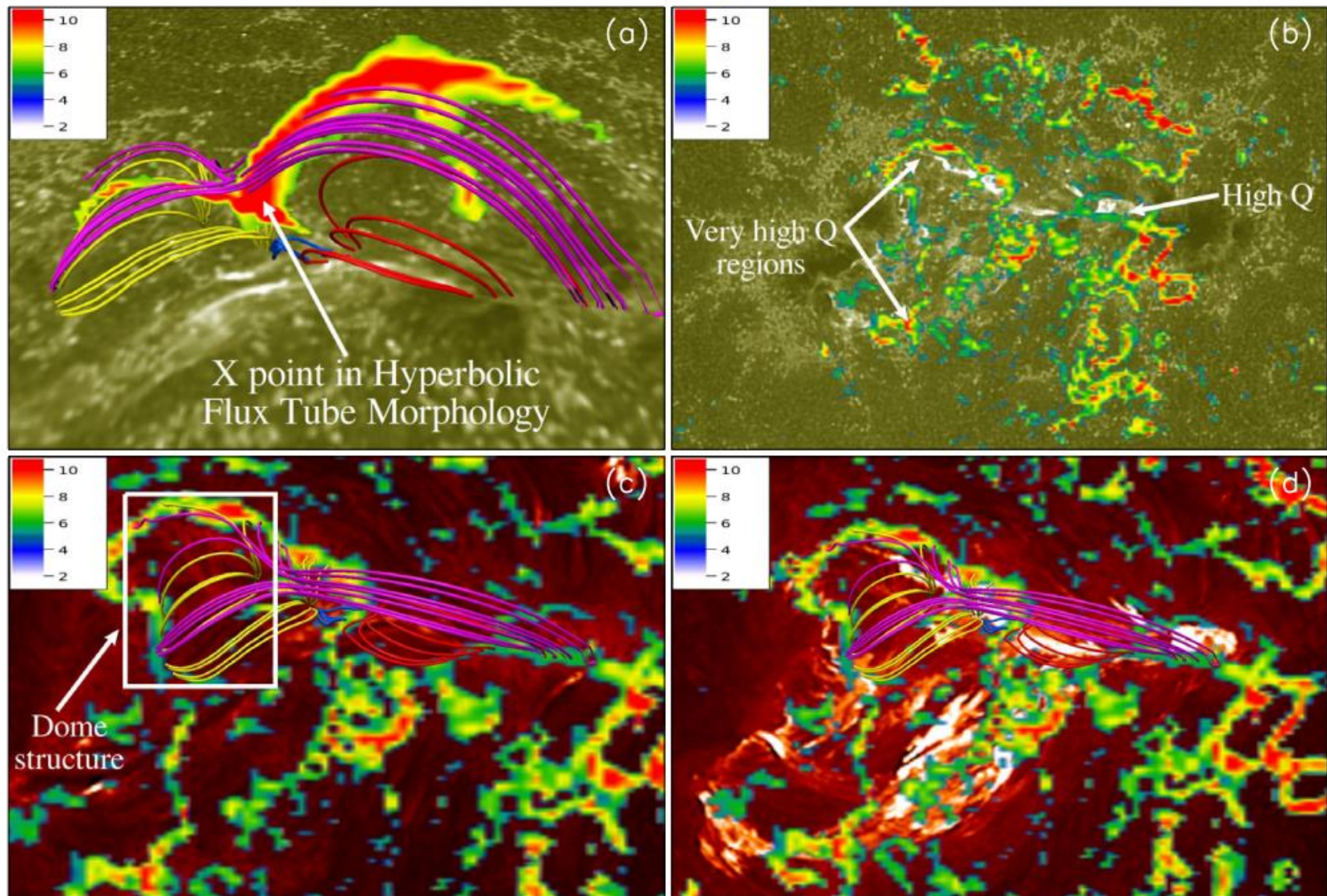


Fig. 2. Magnetic flux distribution and surface rotation flow at the bottom end. Same details as in Fig. 1 but with different values of $y_c = 0.1, 0.6, 1.1,$ and $1.6,$ respectively, while $\sigma_x = 2.0$ and $\sigma_y = 1.0$ are fixed.

Study of Reconnection Dynamics and Plasma Relaxation in MHD Simulation of a Solar Flare

Satyam Agarwal^{1,2}  · Ramit Bhattacharyya¹  · Shangbin Yang^{3,4,5} 



Study of Reconnection Dynamics and Plasma Relaxation in MHD Simulation of a Solar Flare

Satyam Agarwal^{1,2}  · Ramit Bhattacharyya¹  · Shangbin Yang^{3,4,5} 

