ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЛЕТНЫХ ИОНОВ В ТТС С ДВУМЯ САМОСОГЛАСОВАННЫМИ И ПОСТОЯННОЙ НОРМАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТАМИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

О. В. Мингалев [1], И. В. Мингалев [1], Х. В. Малова [2,3], А. В. Артемьев [2], Л. М. Зеленый [2], М. Н. Мельник [1]

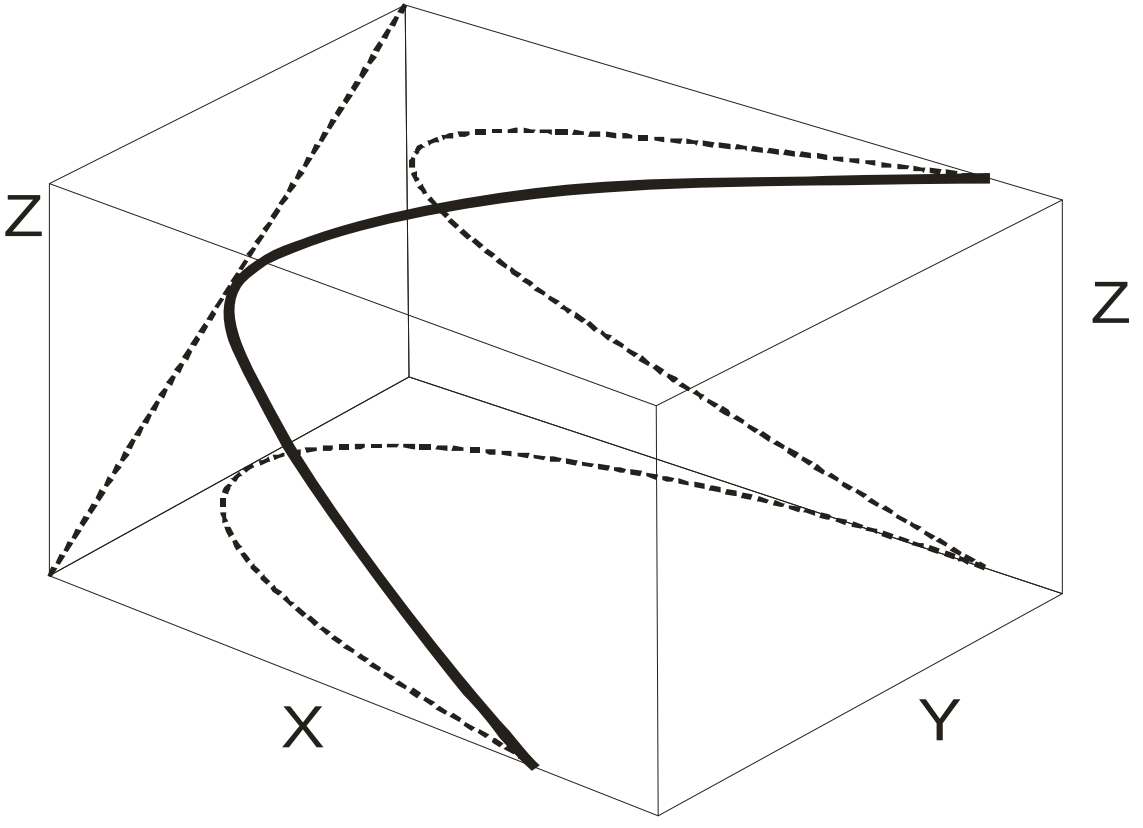
1. Полярный геофизический институт Кольского научного центра РАН

2. Институт космических исследований РАН

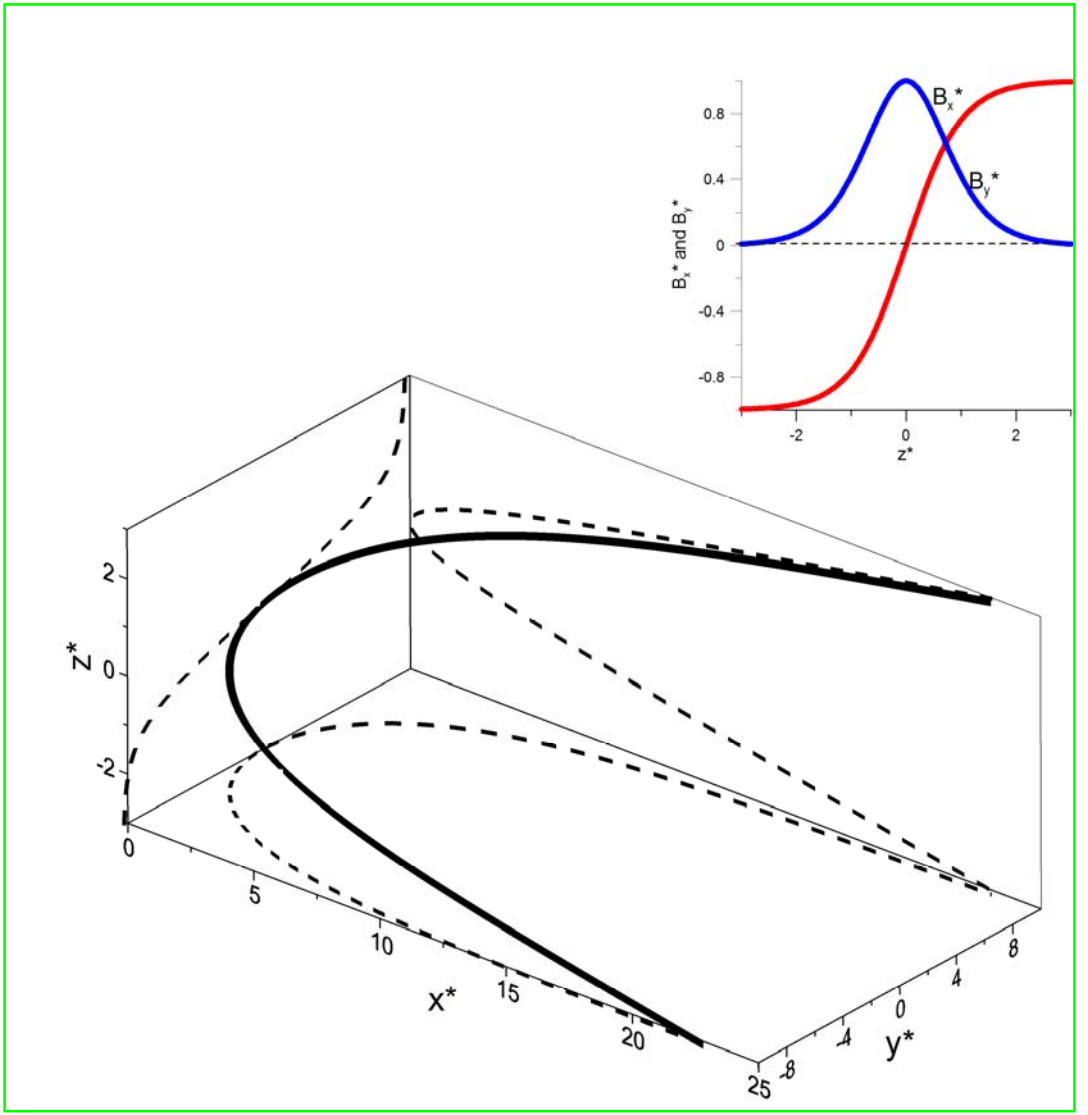
3. Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ

Создан вариант основанной на методе крупных частиц численной модели ТТС в хвосте магнитосферы с двумя самосогласованными компонентами магнитного поля (тангенциальной B_x и сдвиговой B_y), и постоянной нормальной (B_z). При этом силовые линии магнитного поля не лежат в одной плоскости. Расчеты показали, что для одних и тех же входных данных могут существовать две различные равновесные конфигурации ТТС. В первой из них профиль компоненты $B_y(z)$ близок к антисимметричному, и магнитные силовые линии закручены внутри слоя. При этом, однако, профили плотности плазмы, компоненты плотности тока $j_y(z)$ и компоненты магнитного поля $B_x(z)$ мало отличаются от случая с магнитным полем без сдвига ($B_y \equiv 0$). Во второй конфигурации профиль компоненты $B_y(z)$ имеет "колоколообразную" форму, а полная величина магнитного поля и плотность плазмы в слое мало изменяются. Магнитные силовые линии лежат на изогнутой поверхности, а толщина токового слоя становится примерно вдвое больше. Для обеих конфигураций исследуется структура функции распределения поддерживающих токовый слой пролетных ионов.

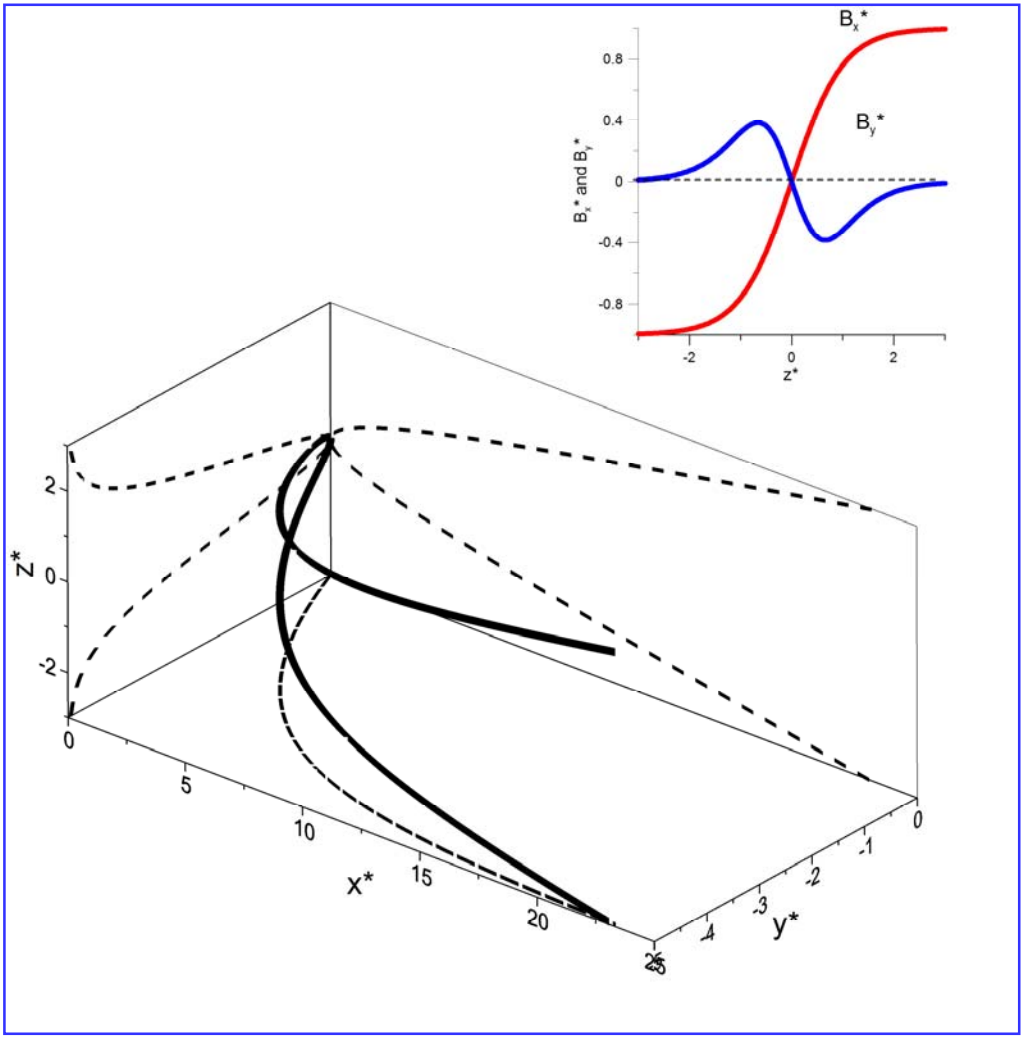
B_y=const



колоколообразное $B_y(z)$



Антисимметричное $B_y(z)$



Модель имеет размерность 1D3V, в ней учитываются только протоны, а электроны рассматриваются как холодный нейтрализующий фон. Используется система координат де Хоффмана-Теллера. Магнитное поле и ток имеют вид:

$$\mathbf{B} = B_x(z)\,\mathbf{e}_x + B_y(z)\,\mathbf{e}_y + B_z\,\mathbf{e}_z\,, \quad \mathbf{j} = j_x(z)\,\mathbf{e}_x + j_y(z)\,\mathbf{e}_y\,.$$

Вне слоя в долях хвоста магнитное поле считается постоянным:

$$\mathbf{B}\Big|_{z>L} = B_x(L)\mathbf{e}_x + B_y^E\mathbf{e}_y + B_z\,\mathbf{e}_z\,, \quad \mathbf{B}\Big|_{z<-L} = B_x(-L)\mathbf{e}_x + B_y^E\mathbf{e}_y + B_z\,\mathbf{e}_z \qquad (1)$$

(здесь $\mathbf{e}_x$, $\mathbf{e}_y$, $\mathbf{e}_z$ — базисные векторы системы *GSM*). Токовый слой образуется двумя встречными потоками плазмы, которые набегают из долей хвоста вдоль силовых линий магнитного поля с гидродинамической скоростью величиной V_D и имеют максвелловское распределение с температурой протонов T_0 :

$$f_\pm(z,\mathbf{v}) = \frac{n_\pm}{\left(V_{T0}\sqrt{2\pi}\right)^3}\exp\left\{-\frac{|\mathbf{v}-\mathbf{U}(z)|^2}{2V_{T0}^2}\right\}, \quad \mathbf{U}(z) = -\frac{z}{|z|}V_D\mathbf{b}\,, \quad V_{T0} = \sqrt{\frac{eT_0}{m_p}}\,.$$

Условия силового баланса вдоль осей X, Y и Z имеют вид

$$\Pi_{x,z}(z) - \frac{1}{\mu_0}B_zB_x(z) = const\,, \quad \Pi_{y,z}(z) - \frac{1}{\mu_0}B_zB_y(z) = const\,,$$
$$\Pi_{z,z}(z) + \frac{1}{2\mu_0}\left(|B_x(z)|^2 + |B_y(z)|^2\right) = const\,,$$

где компоненты тензора напряжений $\Pi_{i,k}(z)$ определяются формулами

$$\Pi_{i,k}(z) = m_p \int v_i \, v_k \, f(z, \mathbf{v}) \, d^3\mathbf{v} \, .$$

Из условия баланса по оси Z вытекает граничное условие для компоненты $B_x(z)$:

$$B_x(\pm L) = \mu_0 \, \frac{\Delta \Pi_{z,z}}{\Delta B_x} \pm \frac{1}{2} \Delta B_x \, , \tag{2}$$

где $\Delta \Pi_{z,z} = \Pi_{z,z}(L) - \Pi_{z,z}(-L) \, , \quad \Delta B_x = B_x(L) - B_x(-L) \, .$

В ходе расчетов методом частиц совместно решается стационарное 1D3V уравнение Власова для протонов

$$v_z \frac{\partial f}{\partial z} + \frac{e}{m_p} \left([\, \mathbf{v} \times \mathbf{B} \,] \, , \frac{\partial f}{\partial \mathbf{v}} \right) = 0 \, , \tag{3}$$

и 1-мерное уравнение Ампера для магнитного поля $\operatorname{rot} \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j}$, которое дает два уравнения

$$\frac{dB_x(z)}{dz} = \mu_0 \, j_y(z) \, , \quad \frac{dB_y(z)}{dz} = -\mu_0 \, j_x(z) \tag{4}$$

и вместе с граничными условиями (1) и (2) определяет магнитное поле. Плотность тока определяется формулой

$$\mathbf{j}(z) = e \int \mathbf{v} \, f(z, \mathbf{v}) \, d^3\mathbf{v} \, .$$

Входными параметрами модели являются:
1) z-компонента магнитного поля B_z;
2) внешняя заданная часть y-компоненты магнитного поля B_y^E;
3) температура протонов в потоках плазмы на границе области расчетов T_0;
4) величина средней скорости падающего потока плазмы вдоль силовых линий магнитного поля V_D;
5) величина изменения в токовом слое x-компоненты магнитного поля ΔB_x.

В ходе моделирования в слое рассчитываются концентрация $n(z)$, компоненты плотности тока протонов $\mathbf{j}(z)$, самосогласованные компоненты магнитного поля $B_x(z)$ и $B_y(z)$, а также компоненты тензора напряжений $\Pi_{i,k}(z)$.

Также вычислялись компоненты тензора давлений $P_{i,k}(z)$, которые определяются формулами

$$P_{i,k}(z) = \Pi_{i,k}(z) - j_i(z)j_k(z)/(e^2 n(z)).$$

Вычислялись собственные числа тензора давлений $P_1(z) \le P_2(z) \le P_3(z)$, а также вычислялись продольное давление $p_{\|}$ и давление p_n вдоль ортогонального магнитному полю вектора $\mathbf{n} = (B_z\,\mathbf{e}_y - B_y\,\mathbf{e}_z) \Big/ \sqrt{B_z^2 + B_y^2}$, В представленных далее расчетах входные параметры модели имели следующие значения: $B_z = 2\,$нТл, $\Delta B_x = 40\,$нТл, $T_0 = 4\,$кэв, $V_D = 2V_{T0}$, где $V_{T0} = \sqrt{eT_0/m_p}$ — тепловая скорость протонов в источнике. Область моделирования имеет полуширину $L = R_E$, шаг сетки $h = R_E/512$.

С целью сравнения были получены равновесные конфигурации ТТС в следующих случаях относительно компоненты B_y.

1) Две конфигурации без учета самосогласованной части $B_y(z)$: $B_y \equiv 0$; и $B_y \equiv B_y^E = 1$ нТл;

2) Восемь конфигураций с учетом самосогласованной части $B_y(z)$: по две конфигурации для каждого из 4-х значений $B_y^E = 0,\ 1,\ 2,\ 3$ нТл, одна антисимметричного типа, а другая колоколообразного типа.

Для каждой конфигурации в 7 точках z_s, $s = 0,\ 1,\ \ldots,\ 7$: области моделирования строились по три сечения Пуанкаре функции распределения в связанной с магнитным полем системе координат, которая определяется правой ортонормированной тройкой векторов $\{\mathbf{h}_1(z),\ \mathbf{h}_2(z),\ \mathbf{h}_3(z) = \mathbf{b}(z) = \mathbf{B}/|\mathbf{B}|\}$. Здесь ортогональные магнитному полю векторы $\mathbf{h}_1(z),\ \mathbf{h}_2(z)$ определяются формулами

$$\mathbf{h}_1(z) = \frac{B_z\mathbf{e}_x - B_x(z)\mathbf{e}_z}{\sqrt{B_x^2 + B_z^2}}\,, \quad \mathbf{h}_2(z) = [\,\mathbf{b}(z) \times \mathbf{h}_1(z)\,] = \frac{-B_y\,\mathbf{B} + |\mathbf{B}|^2\mathbf{e}_y}{|\mathbf{B}|\sqrt{B_x^2 + B_z^2}}\,.$$

Отметим, что 1) если $B_x(z_0) = 0$, то $\mathbf{h}_1(z_0) = \mathbf{e}_x$;

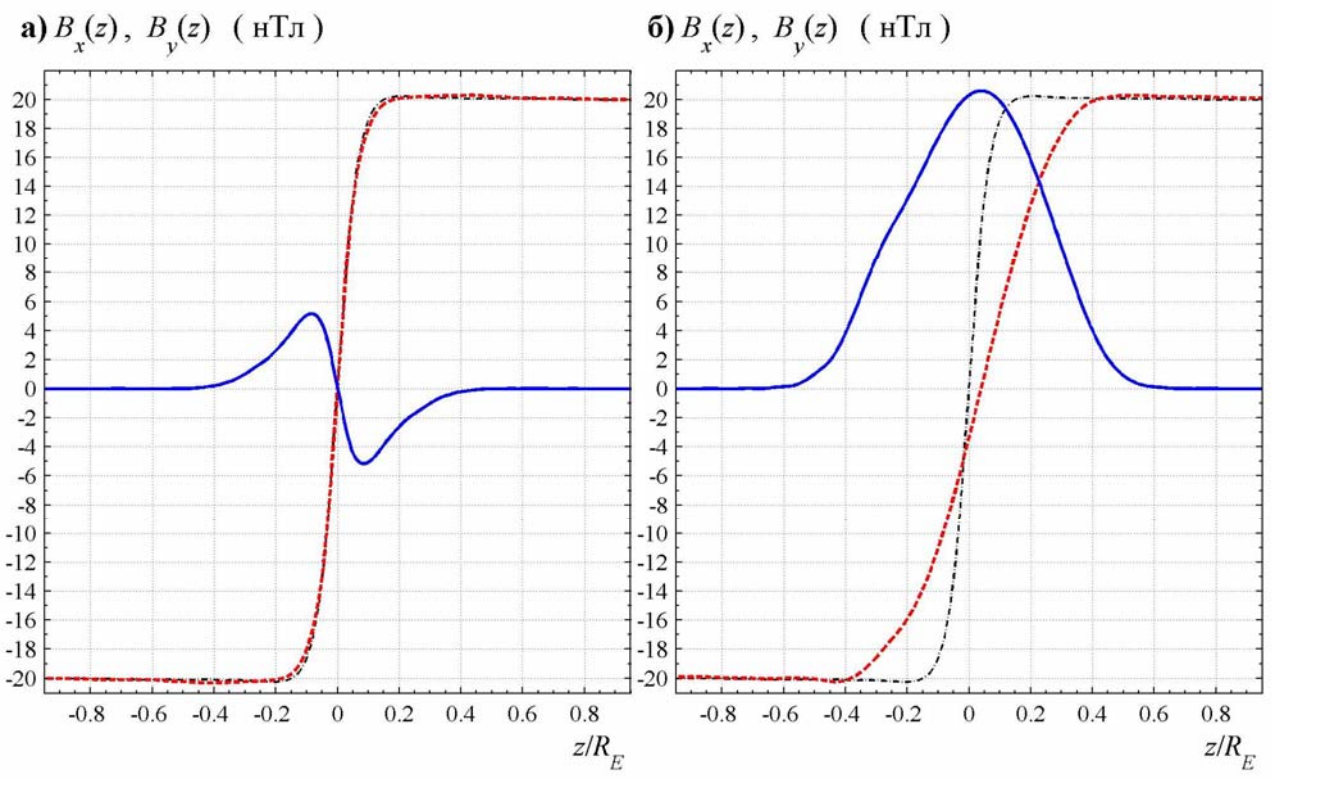
2) если $B_y(z_0) = 0$, то $\mathbf{h}_2(z_0) = \mathbf{e}_y$.

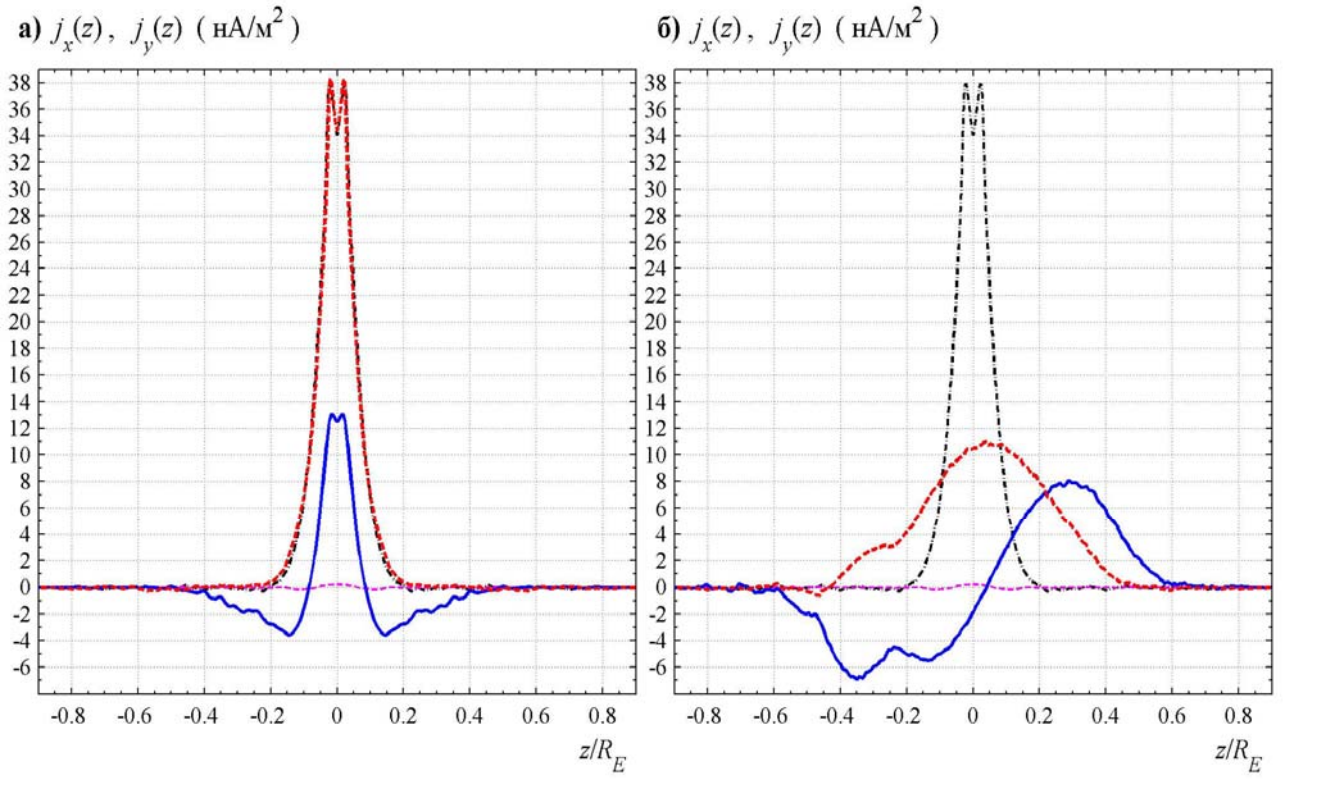
Обозначим компоненты скорости в этой системе координат через

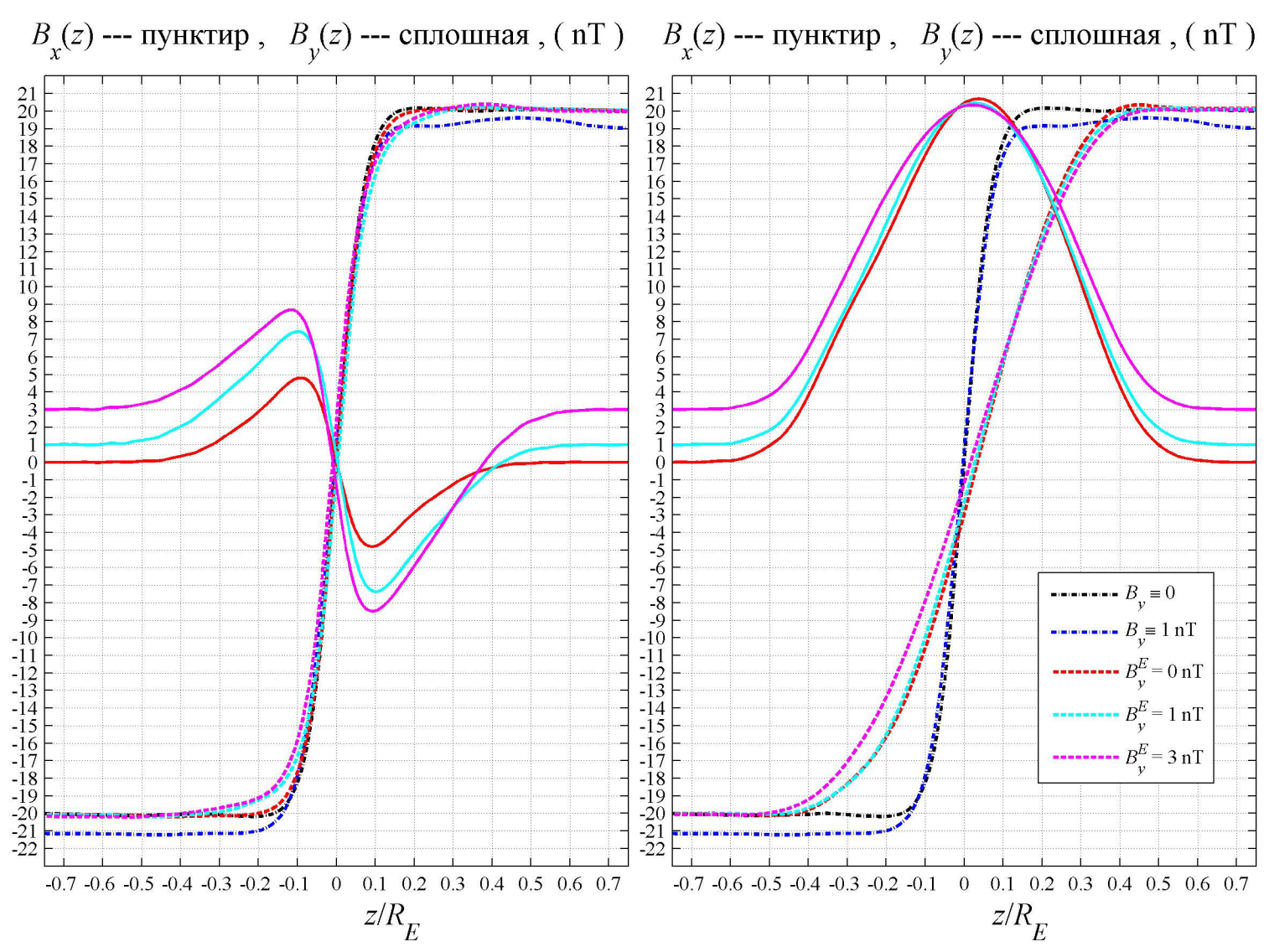
$$V_1 = v_{\perp 1} = (\mathbf{v}; \mathbf{h}_1)\,, \quad V_2 = v_{\perp 2} = (\mathbf{v}; \mathbf{h}_2)\,, \quad V_3 = v_{\parallel} = (\mathbf{v}; \mathbf{b})\,.$$

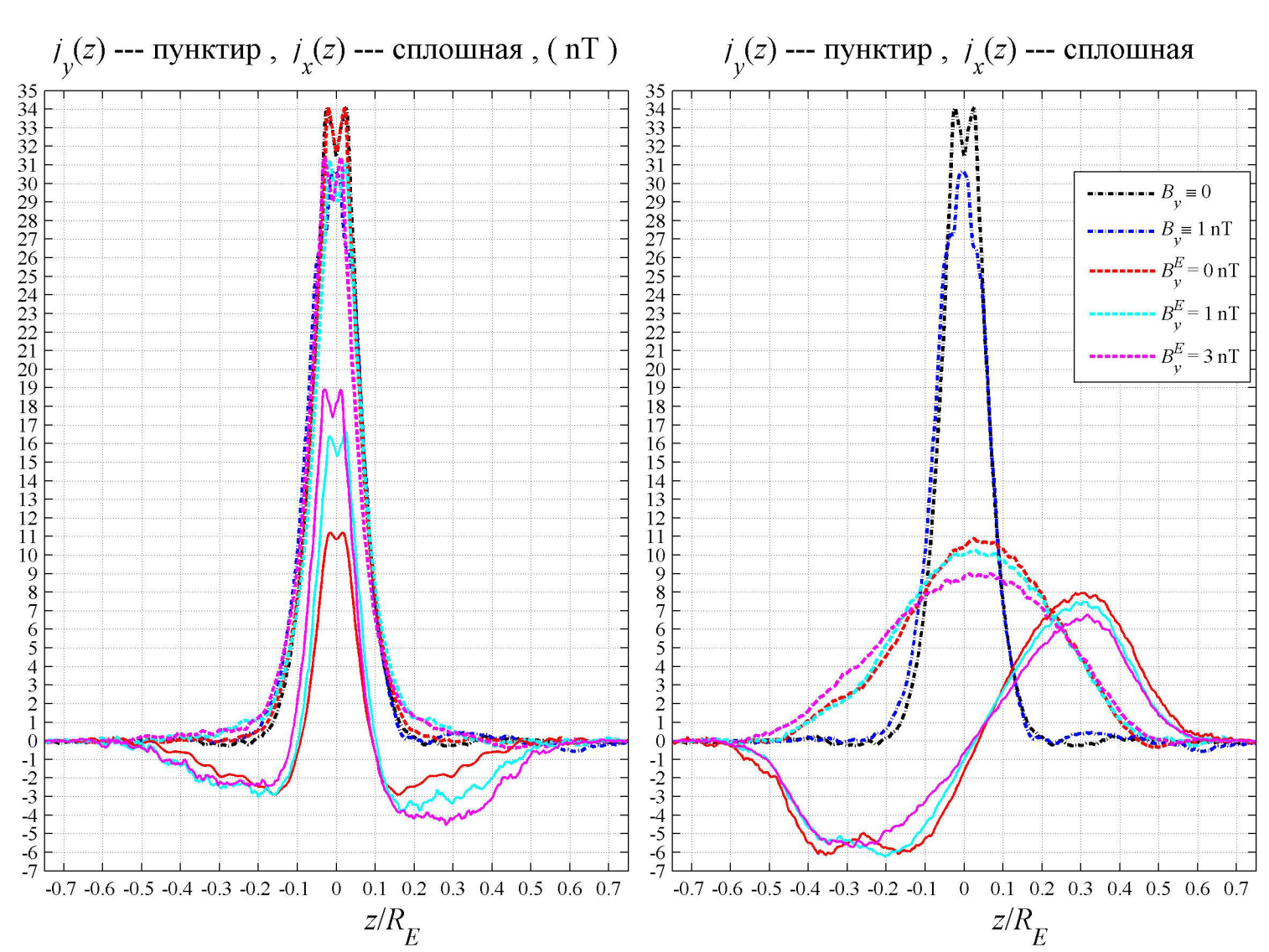
Сечения Пуанкаре функции распределения определяются формулой

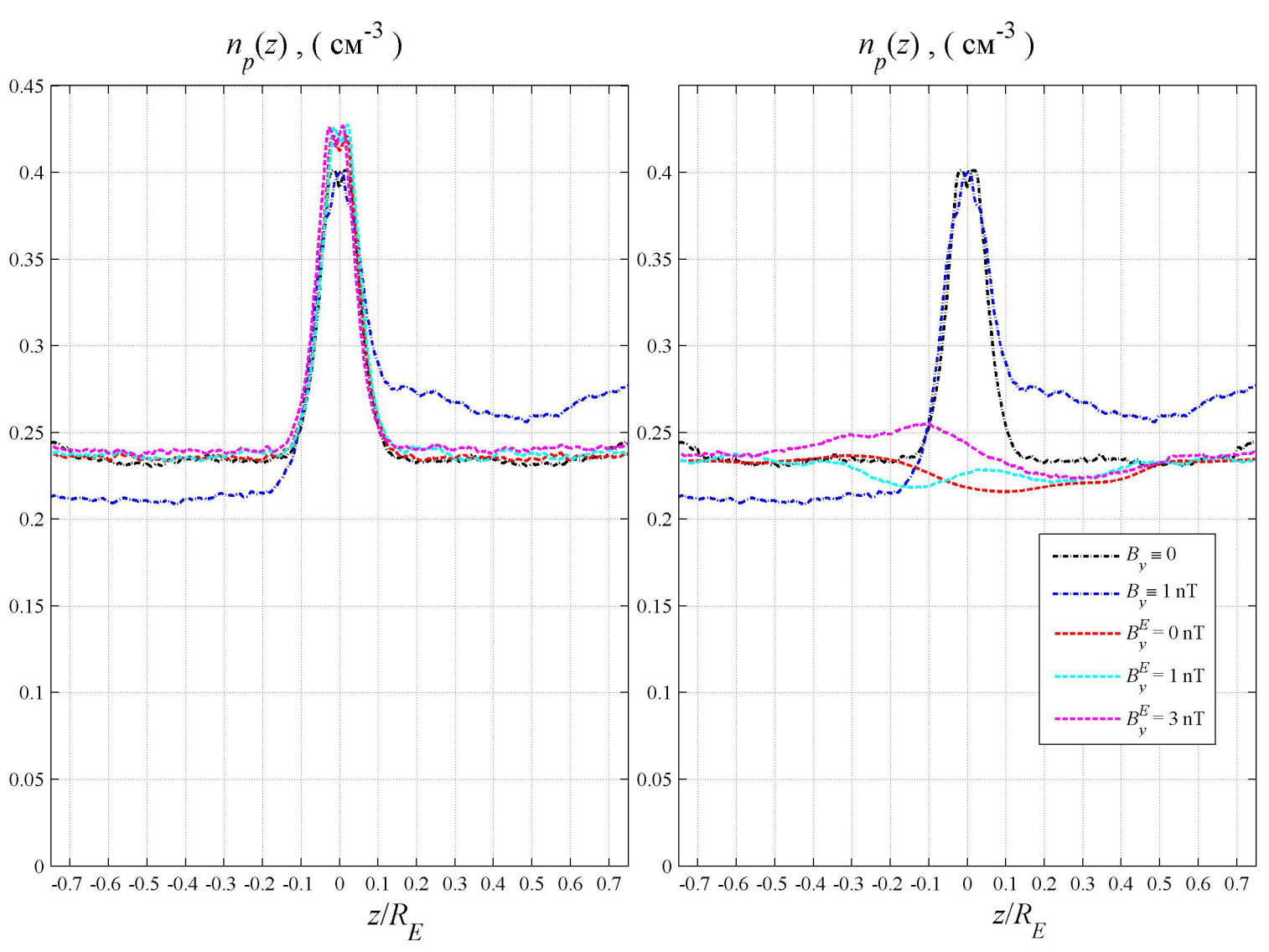
$$F_{i,k}(z, V_i, V_k) = \int f(z, \mathbf{v})\, dV_m\,, \quad \text{где} \quad i \neq k \neq m \neq i\,.$$


а) $B_x(z)$, $B_y(z)$ (нТл)
б) $B_x(z)$, $B_y(z)$ (нТл)
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
-2
-4
-6
-8
-10
-12
-14
-16
-18
-20
-0.8
-0.6
-0.4
-0.2
0
0.2
0.4
0.6
0.8
z/R_E


а) $j_x(z)$, $j_y(z)$ (нА/м^2)
б) $j_x(z)$, $j_y(z)$ (нА/м^2)
38
36
34
32
30
28
26
24
22
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
-2
-4
-6
-0.8
-0.6
-0.4
-0.2
0
0.2
0.4
0.6
0.8
z/R_E


$B_x(z)$ --- пунктир , $B_y(z)$ --- сплошная , (nT)
$B_x(z)$ --- пунктир , $B_y(z)$ --- сплошная , (nT)
z/R_E
z/R_E
$B_y \equiv 0$
$B_y \equiv 1$ nT
$B_y^E = 0$ nT
$B_y^E = 1$ nT
$B_y^E = 3$ nT


$j_y(z)$ --- пунктир , $j_x(z)$ --- сплошная , (nT)
z/R_E
$j_y(z)$ --- пунктир , $j_x(z)$ --- сплошная
$B_y \equiv 0$
$B_y \equiv 1$ nT
$B_y^E = 0$ nT
$B_y^E = 1$ nT
$B_y^E = 3$ nT
z/R_E

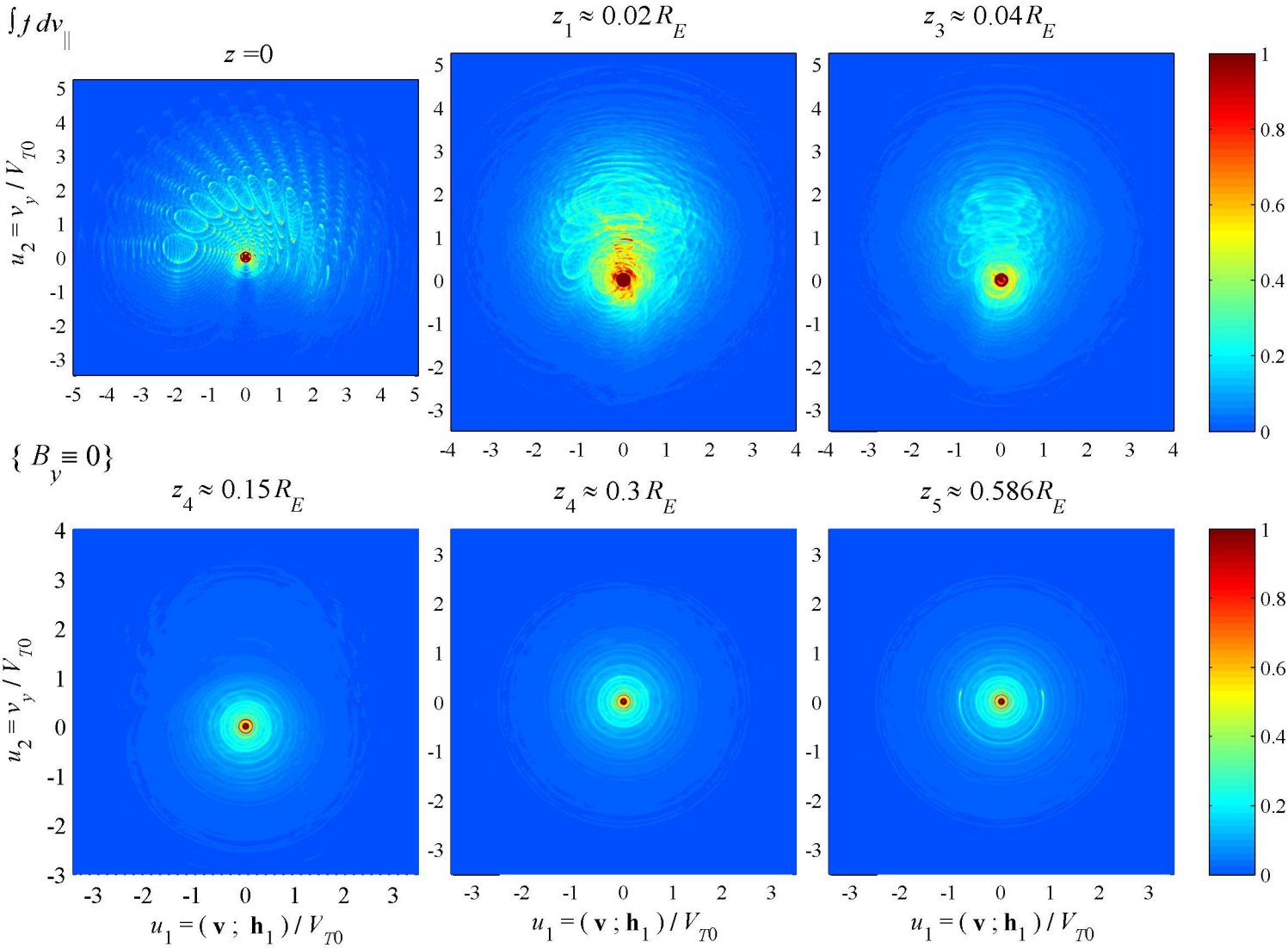

$n_p(z)$, (см$^{-3}$)
$n_p(z)$, (см$^{-3}$)
0.45
0.4
0.35
0.3
0.25
0.2
0.15
0.1
0.05
0
-0.7 -0.6 -0.5 -0.4 -0.3 -0.2 -0.1 0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7
z/R_E
z/R_E
$B_y \equiv 0$
$B_y \equiv 1$ nT
$B_y^E = 0$ nT
$B_y^E = 1$ nT
$B_y^E = 3$ nT

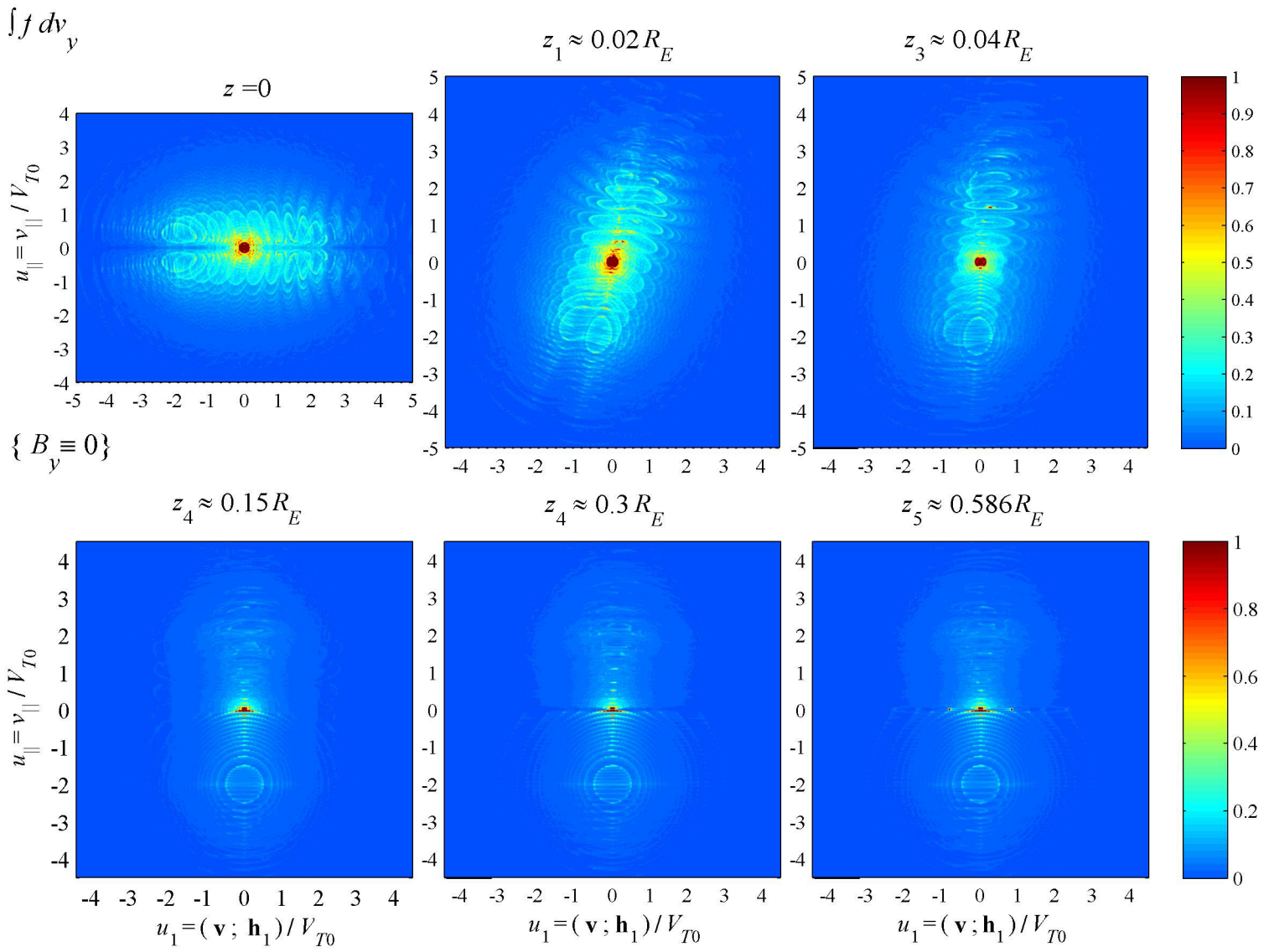
Таким образом, строились следующие 3 сечения

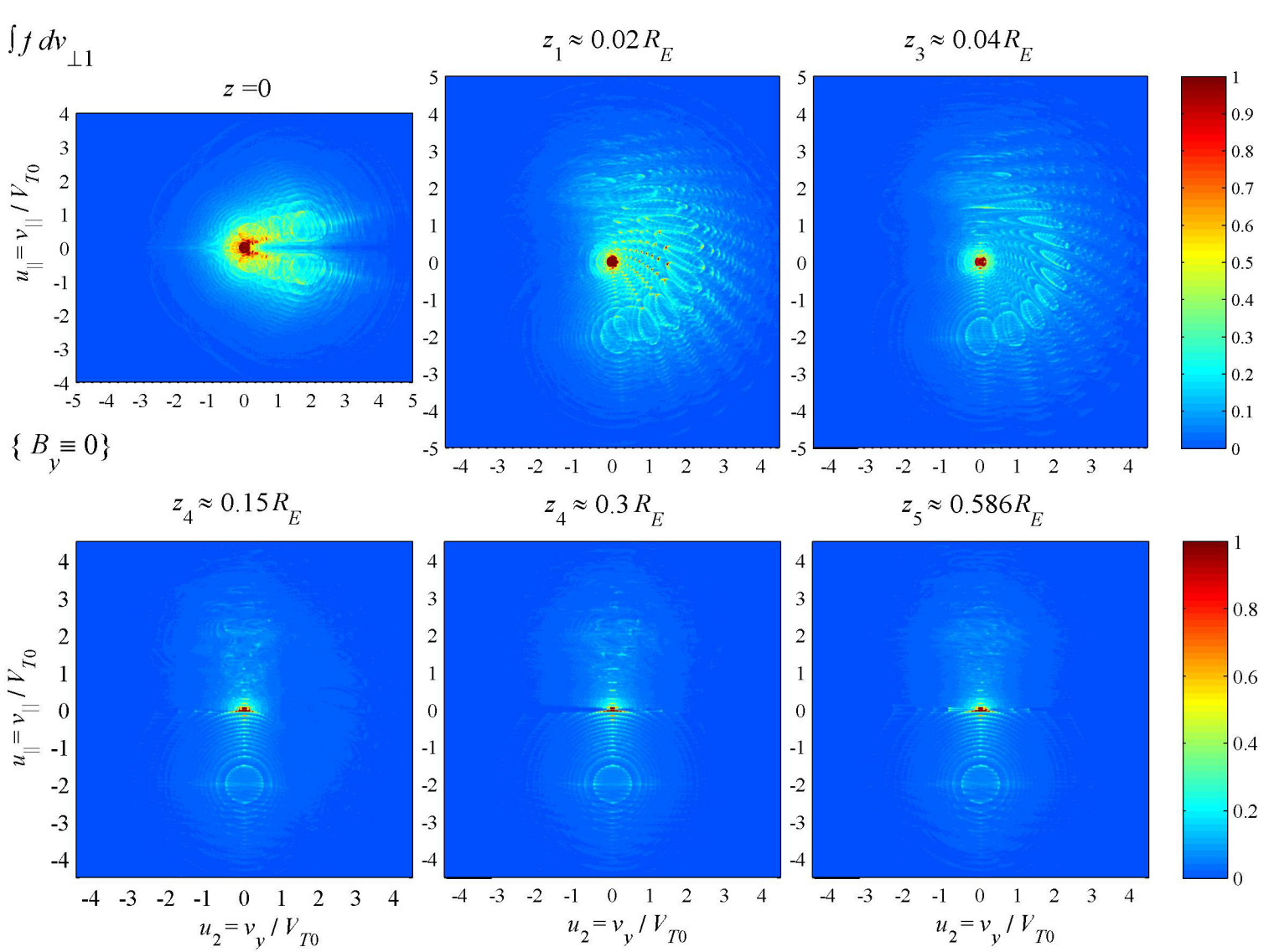
$$F_{1,2}\left(z_s\,, v_{\perp 1}, v_{\perp 2}\right) = \int f(z_s\,, \mathbf{v})\, dv_{\parallel}\,, \quad F_{1,3}\left(z_s, v_{\perp 1}, v_{\parallel}\right) = \int f(z_s\,, \mathbf{v})\, dv_{\perp 2}\,,$$

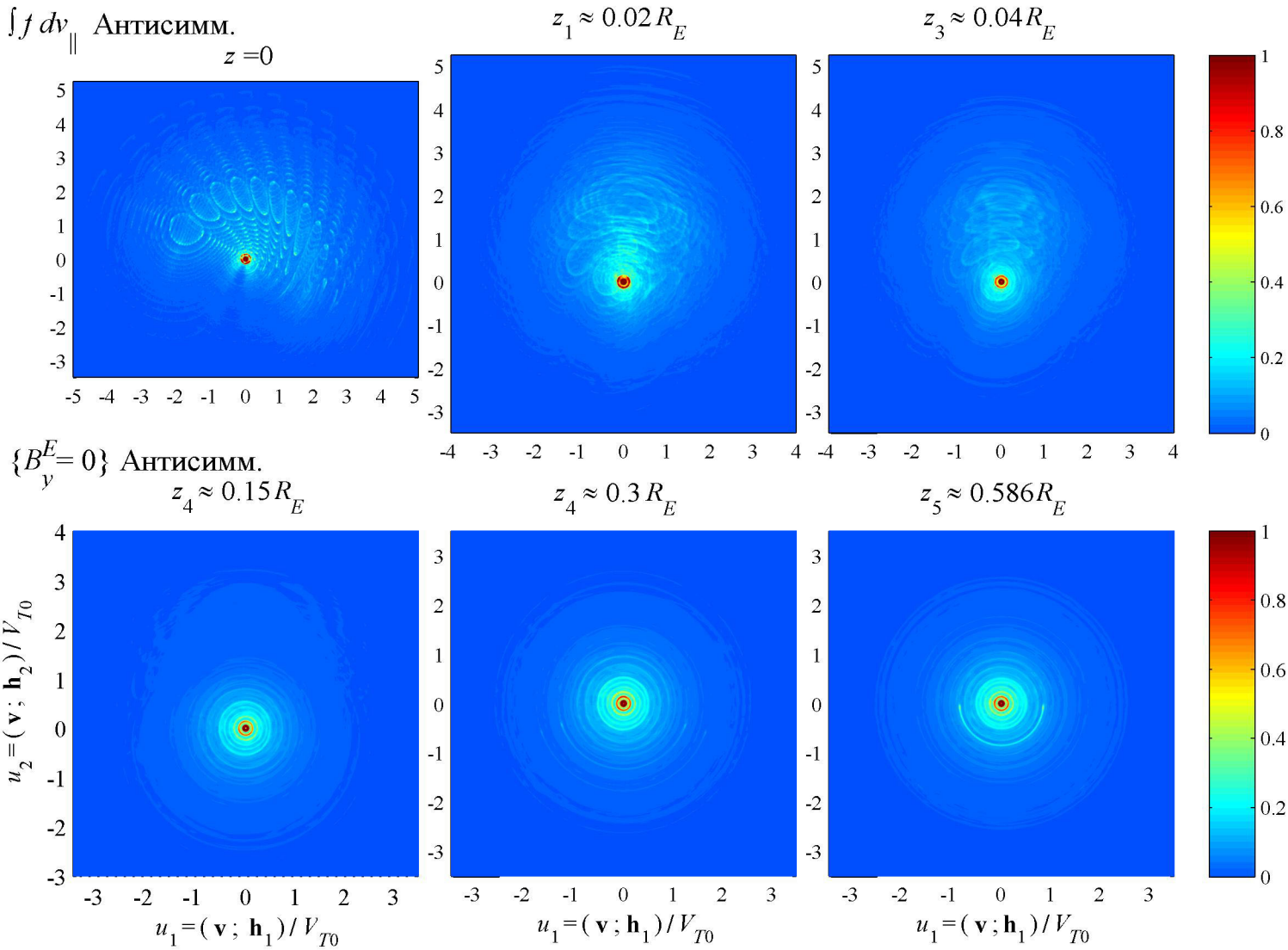
$$F_{2,3}\left(z_s\,, v_{\perp 2}, v_{\parallel}\right) = \int f(z_s\,, \mathbf{v})\, dv_{\perp 1}\,, \quad s = 0,\, 1,\, \ldots,\, 7\,.$$

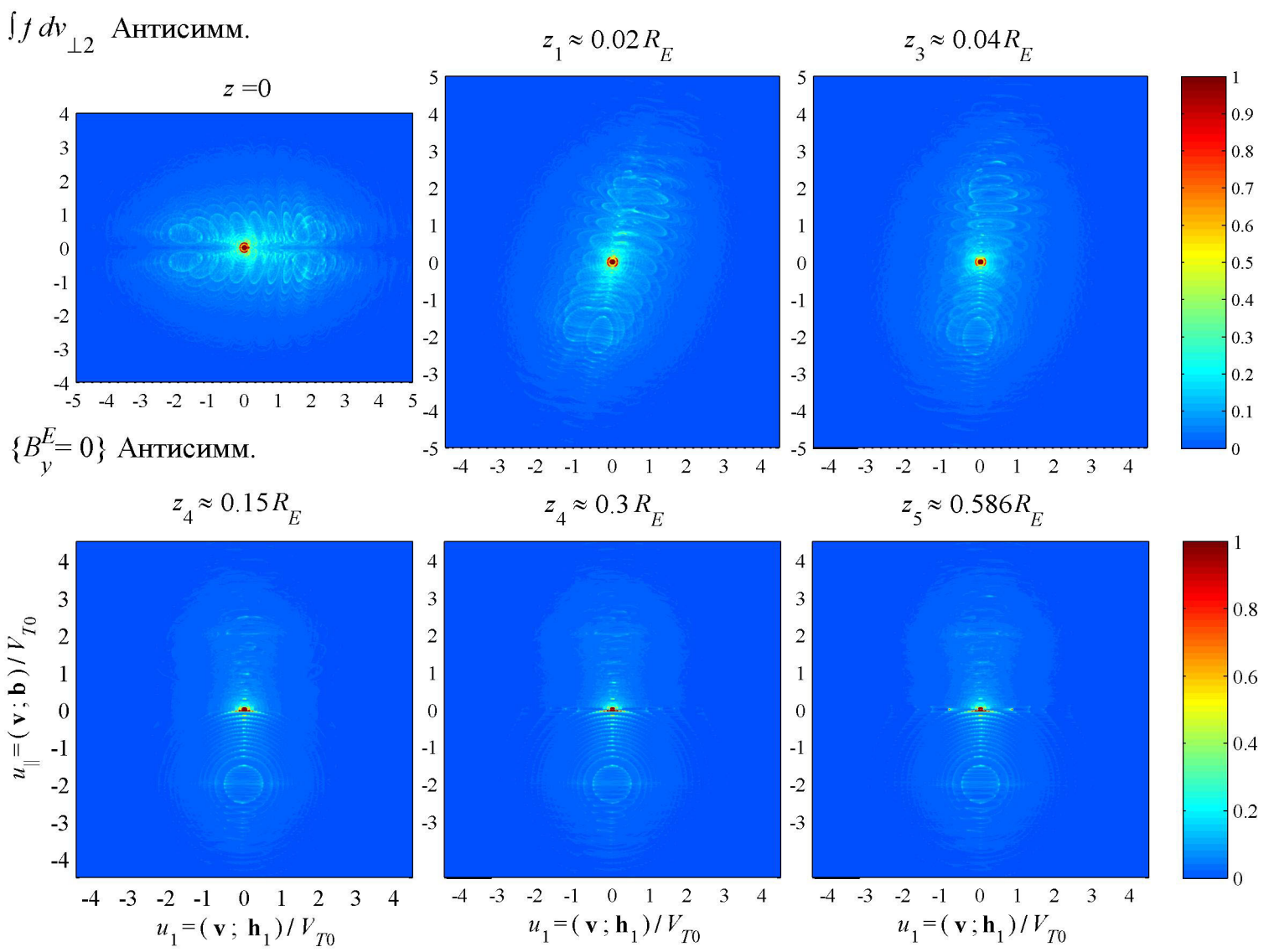
Точки z_s выбирались так: в z_0 компонента $B_x(z_0) = 0\,,\ \ z_1 = z_0 + 5h\,,\ \ z_2 = z_0 + 10h\,,$ $z_3 = z_0 + 20h\,,\ \ z_4 = 77h \approx 0.15R_E\,,\ \ z_5 = 154h \approx 0.3R_E\,,\ \ z_6 = 300h \approx 0.586R_E\,.$

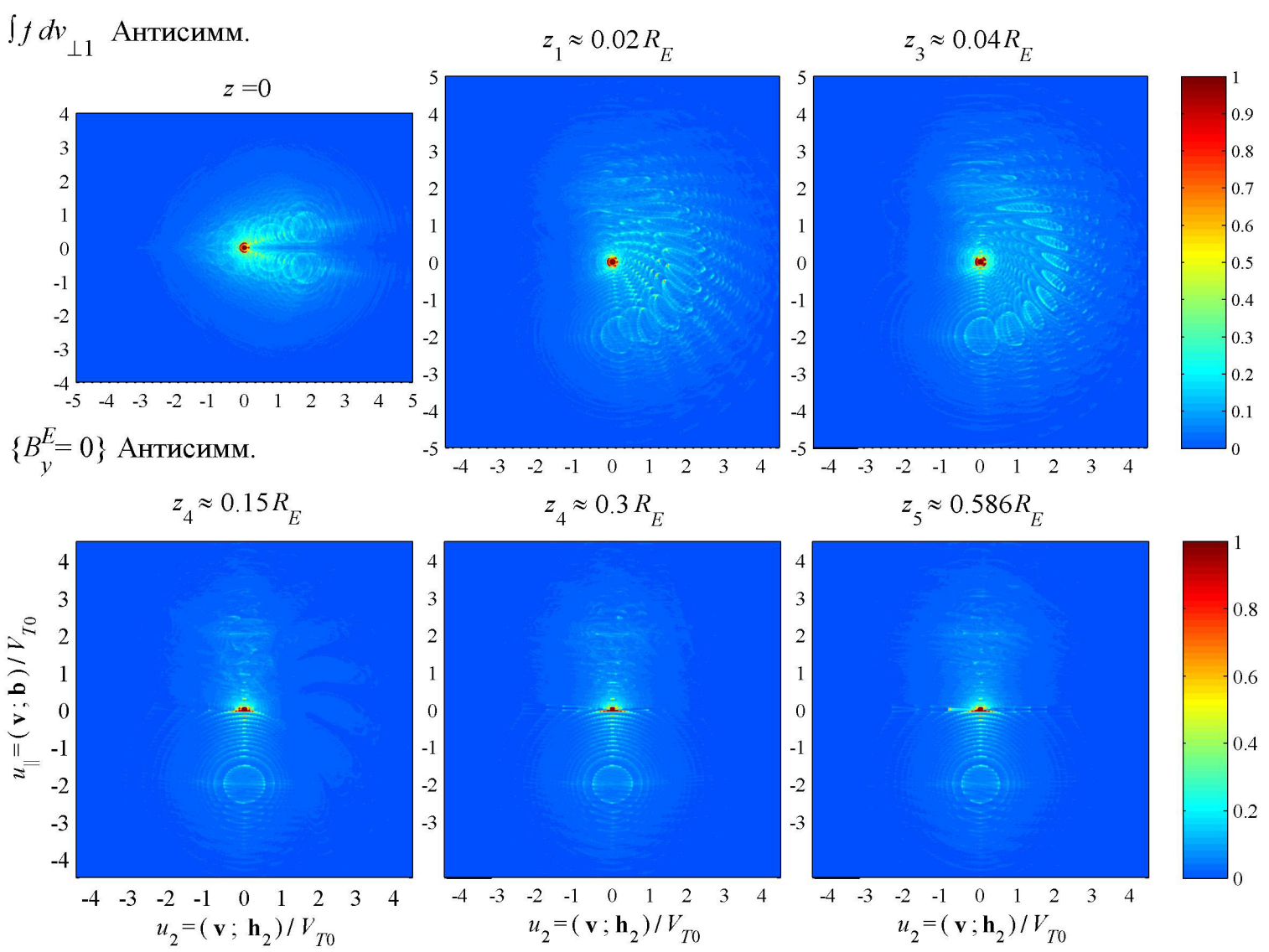

$\int f\, dv_{\parallel}$
$z = 0$
$z_1 \approx 0.02\, R_E$
$z_3 \approx 0.04\, R_E$
$\{ B_y \equiv 0 \}$
$z_4 \approx 0.15\, R_E$
$z_4 \approx 0.3\, R_E$
$z_5 \approx 0.586\, R_E$
$u_2 = v_y / V_{T0}$
$u_1 = (\mathbf{v}\,;\, \mathbf{h}_1) / V_{T0}$

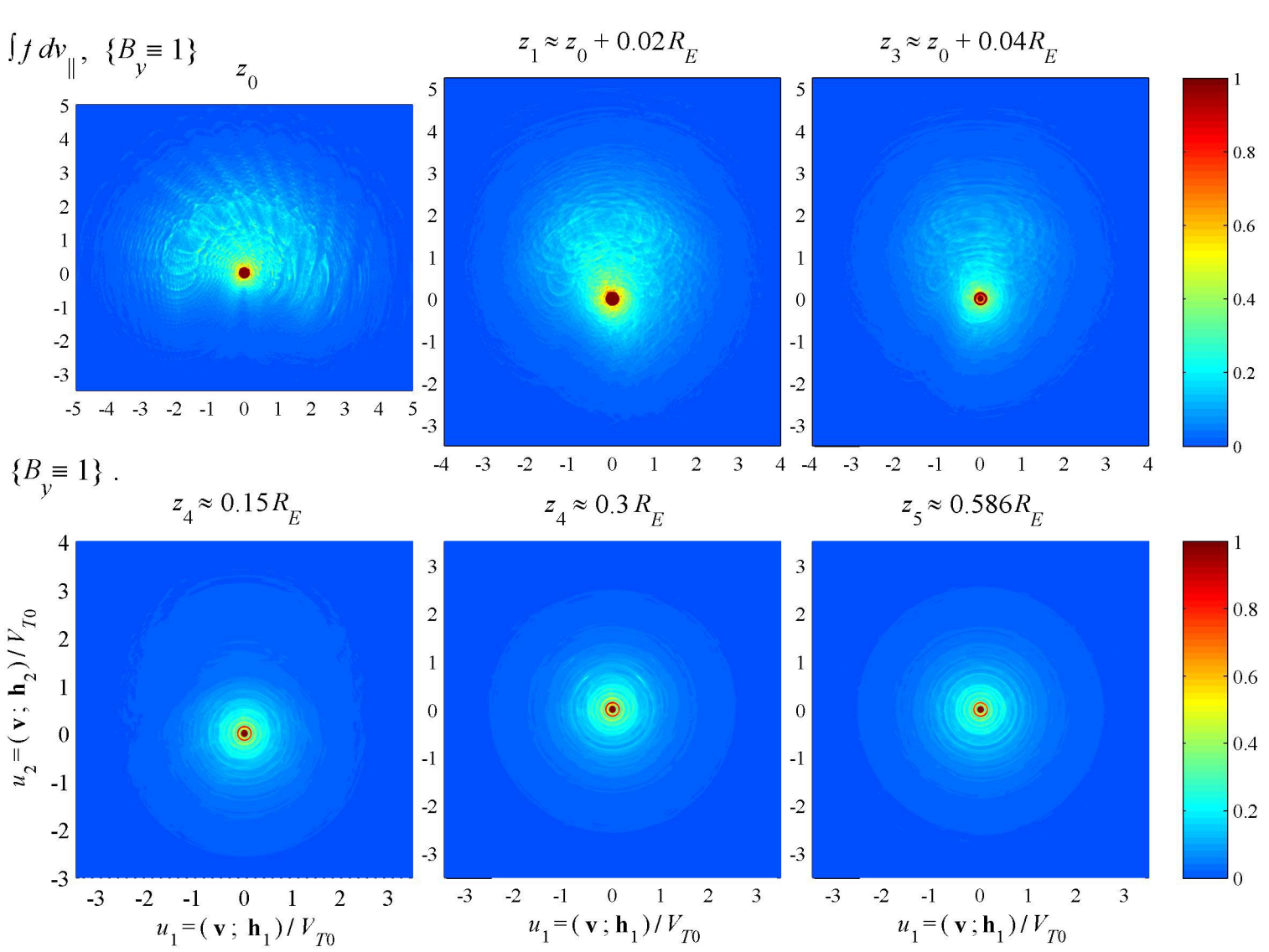

$\int f\, dv_y$
$z = 0$
$z_1 \approx 0.02 R_E$
$z_3 \approx 0.04 R_E$
$u_{\|} = v_{\|} / V_{T0}$
$\{ B_y \equiv 0 \}$
$z_4 \approx 0.15 R_E$
$z_4 \approx 0.3 R_E$
$z_5 \approx 0.586 R_E$
$u_1 = (\mathbf{v}\,;\,\mathbf{h}_1) / V_{T0}$

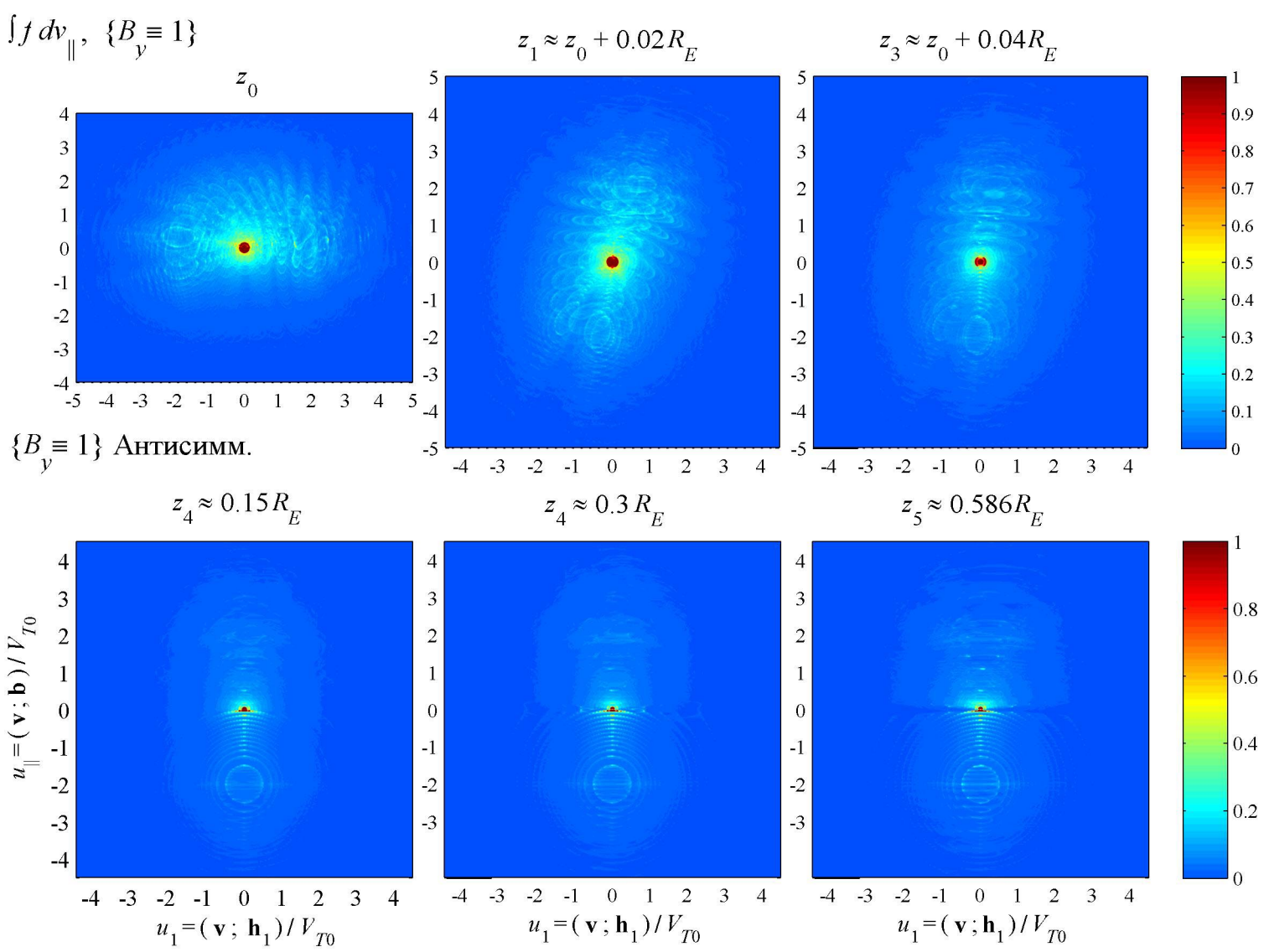

$\int f\, dv_{\perp 1}$
$z = 0$
$z_1 \approx 0.02 R_E$
$z_3 \approx 0.04 R_E$
$\{ B_y \equiv 0 \}$
$z_4 \approx 0.15 R_E$
$z_4 \approx 0.3 R_E$
$z_5 \approx 0.586 R_E$
$u_{\parallel} = v_{\parallel} / V_{T0}$
$u_2 = v_y / V_{T0}$

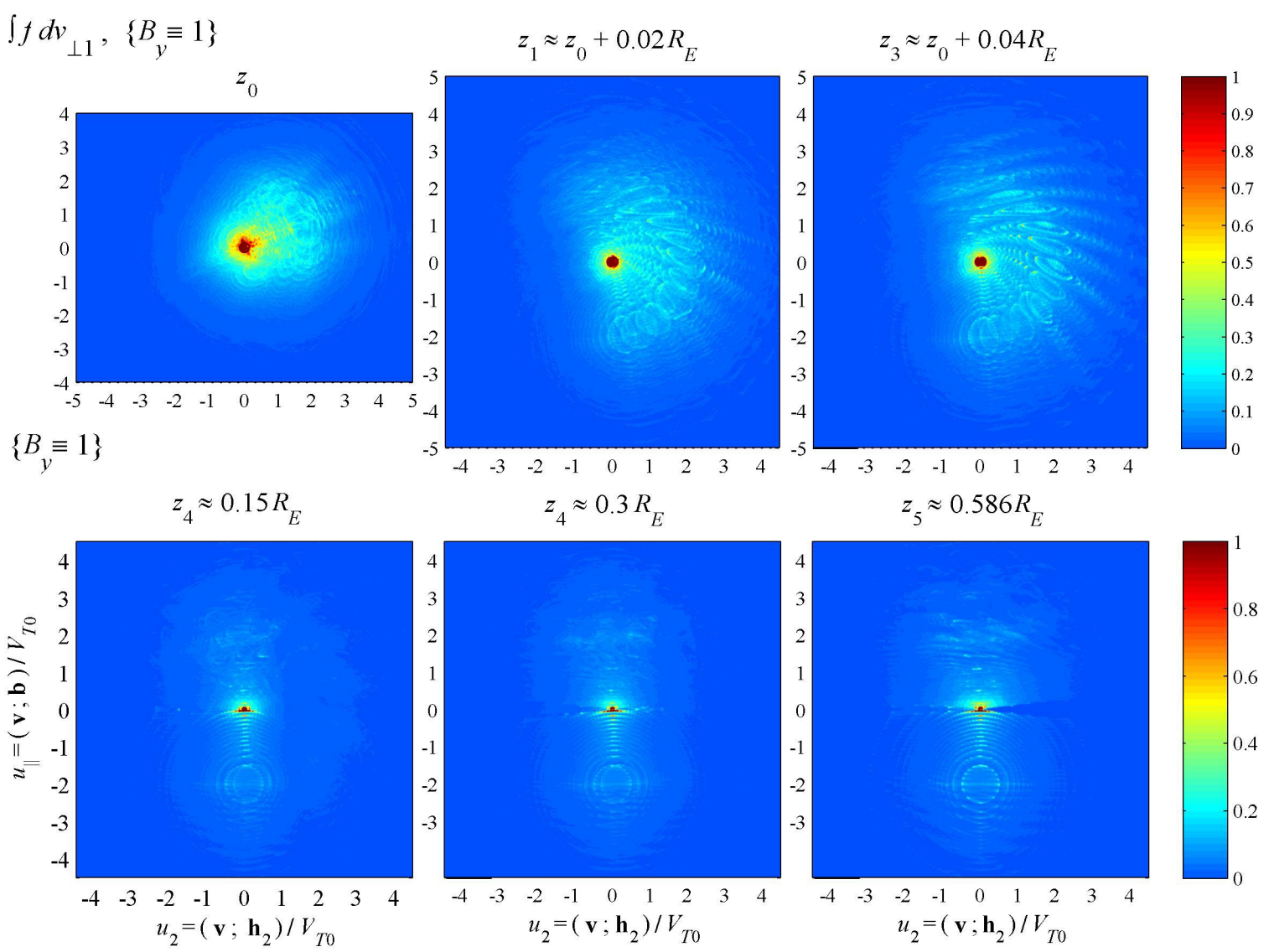

$\int f\, dv_{\parallel}$ Антисимм.
$z = 0$
$z_1 \approx 0.02\, R_E$
$z_3 \approx 0.04\, R_E$
$\{B_y^E = 0\}$ Антисимм.
$z_4 \approx 0.15\, R_E$
$z_4 \approx 0.3\, R_E$
$z_5 \approx 0.586\, R_E$
$u_2 = (\mathbf{v}; \mathbf{h}_2) / V_{T0}$
$u_1 = (\mathbf{v}; \mathbf{h}_1) / V_{T0}$

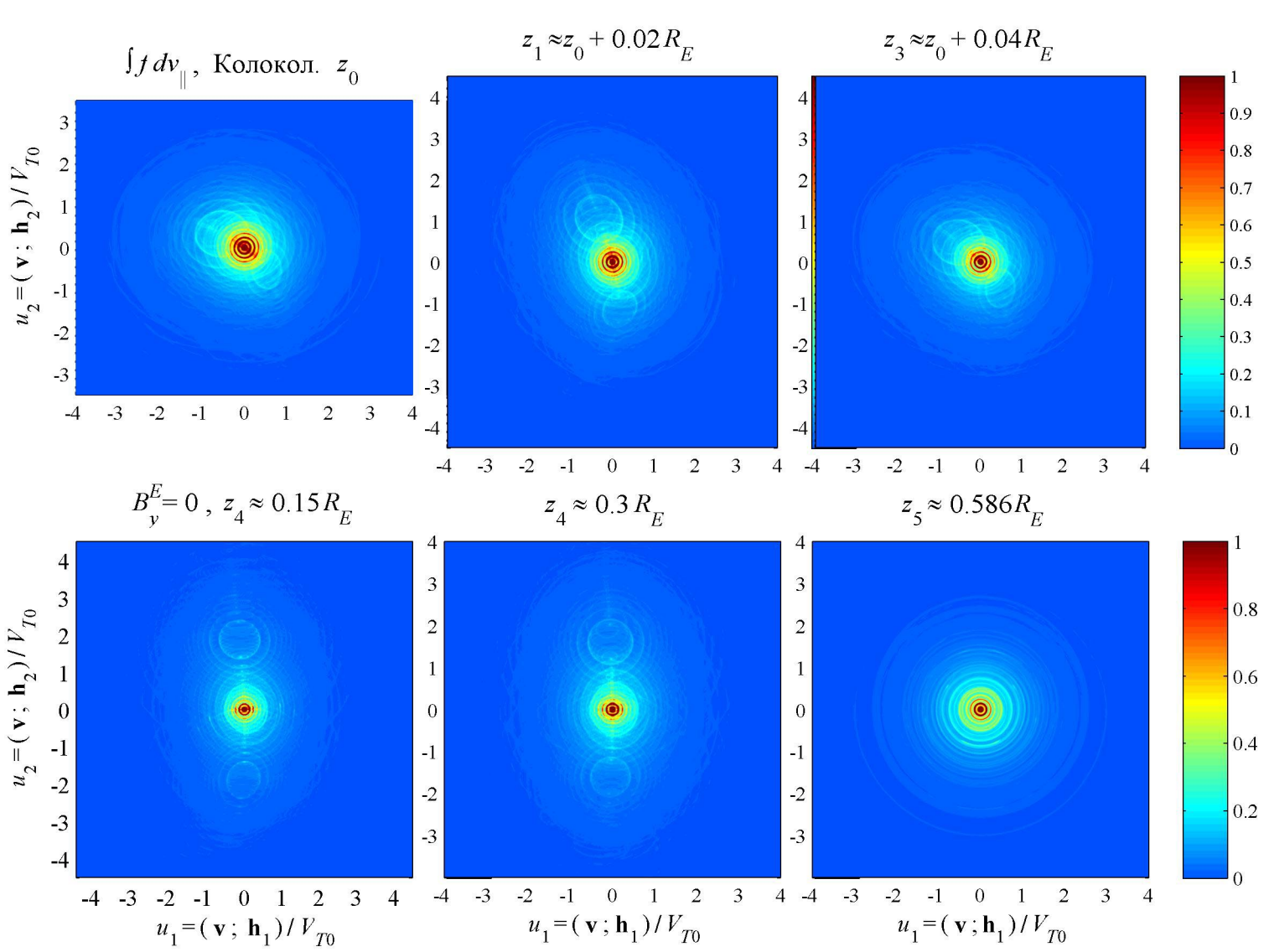

$\int f\, dv_{\perp 2}$ Антисимм.
$z = 0$
$z_1 \approx 0.02 R_E$
$z_3 \approx 0.04 R_E$
$\{B_y^E = 0\}$ Антисимм.
$z_4 \approx 0.15 R_E$
$z_4 \approx 0.3 R_E$
$z_5 \approx 0.586 R_E$
$u_{\parallel} = (\mathbf{v}; \mathbf{b}) / V_{T0}$
$u_1 = (\mathbf{v}; \mathbf{h}_1) / V_{T0}$

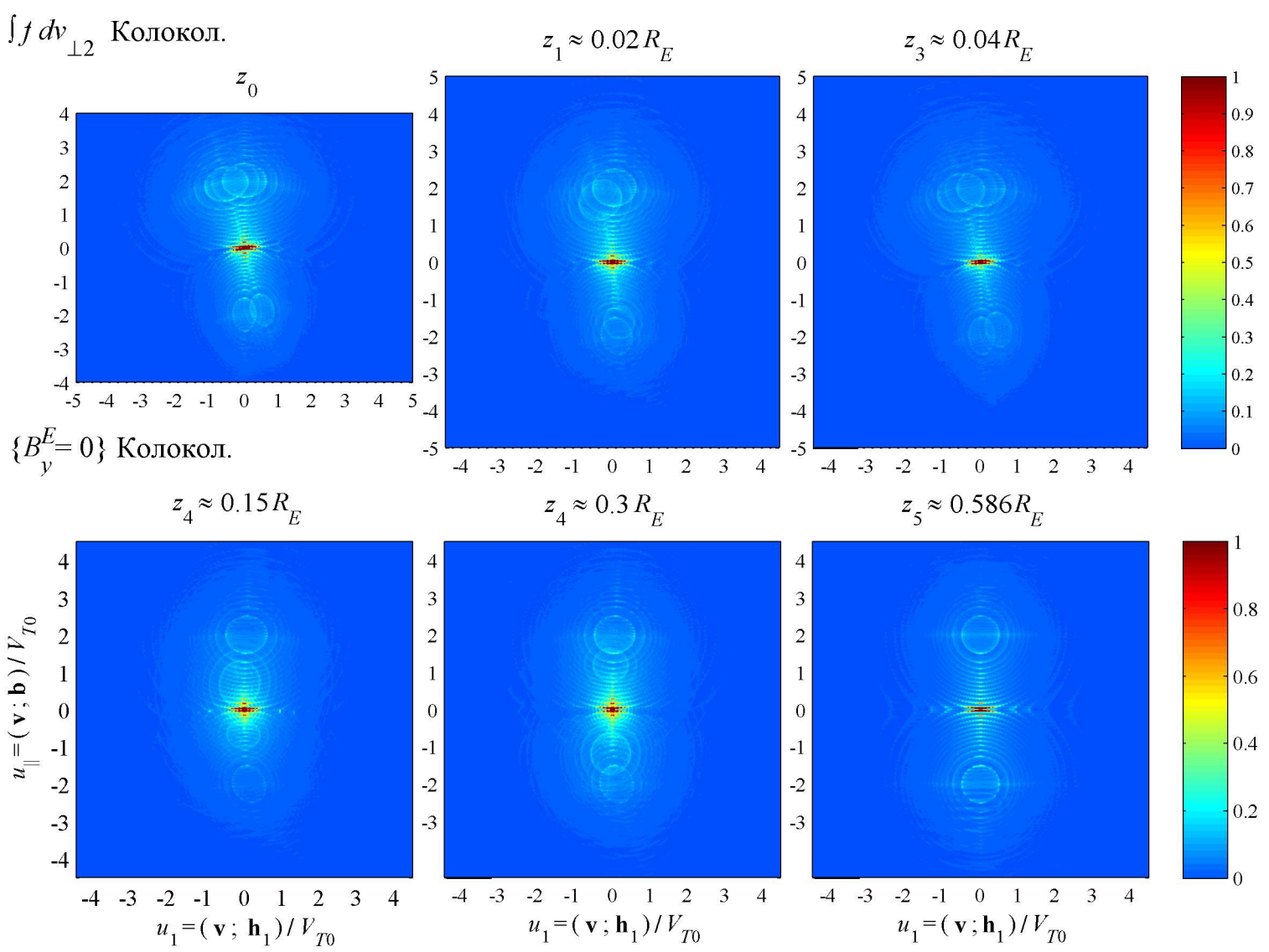

$\int f\, dv_{\perp 1}$ Антисимм.
$z = 0$
$z_1 \approx 0.02 R_E$
$z_3 \approx 0.04 R_E$
$\{B_y^E = 0\}$ Антисимм.
$z_4 \approx 0.15 R_E$
$z_4 \approx 0.3 R_E$
$z_5 \approx 0.586 R_E$
$u_{\parallel} = (\mathbf{v}; \mathbf{b}) / V_{T0}$
$u_2 = (\mathbf{v}; \mathbf{h}_2) / V_{T0}$

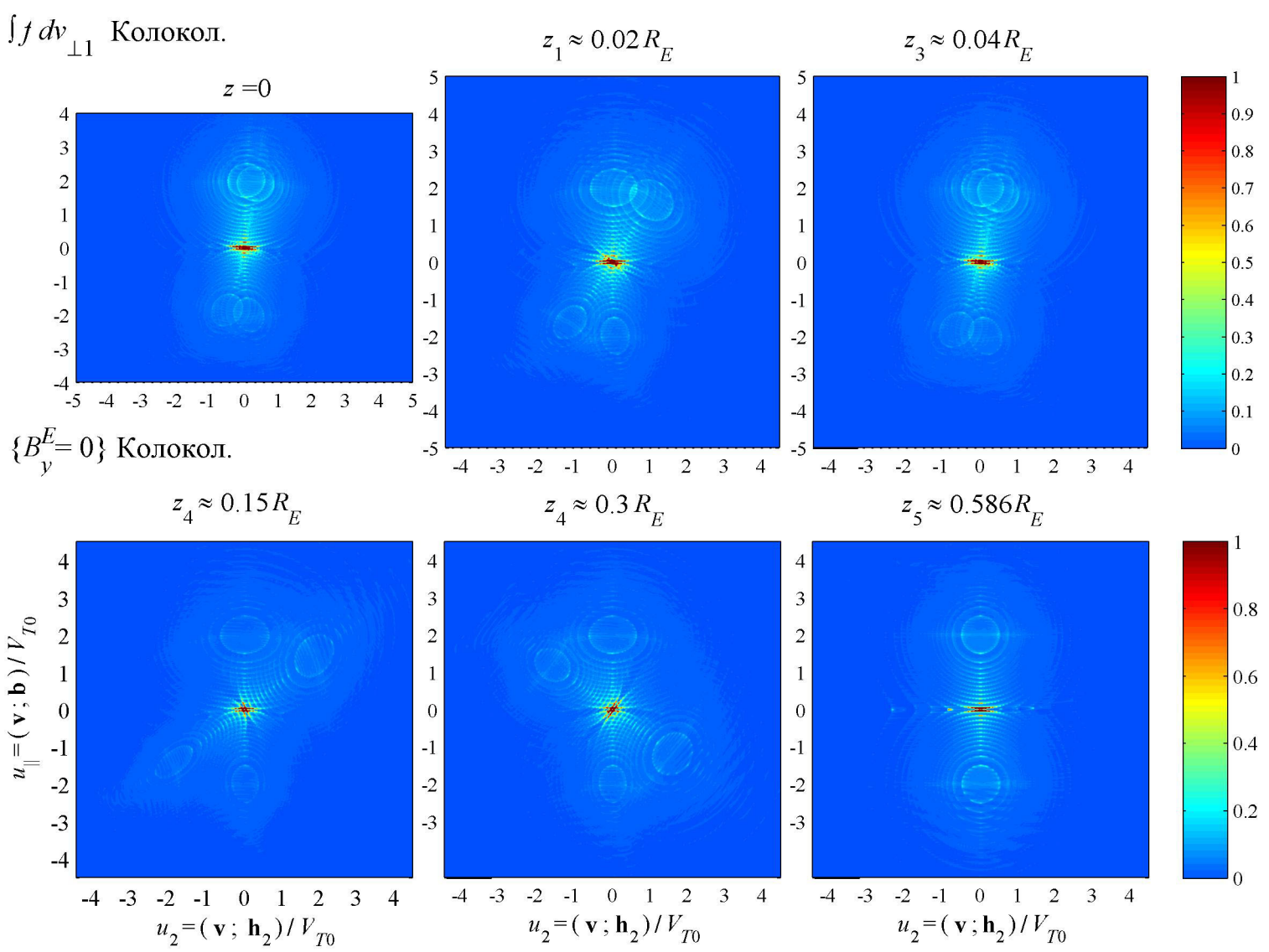

$\int f\, dv_{\|}$, $\{B_y \equiv 1\}$
z_0
$z_1 \approx z_0 + 0.02R_E$
$z_3 \approx z_0 + 0.04R_E$
$\{B_y \equiv 1\}$.
$z_4 \approx 0.15R_E$
$z_4 \approx 0.3R_E$
$z_5 \approx 0.586R_E$
$u_2 = (\mathbf{v};\, \mathbf{h}_2)/V_{T0}$
$u_1 = (\mathbf{v};\, \mathbf{h}_1)/V_{T0}$


$\int f\, dv_{\|}$, $\{B_y \equiv 1\}$
z_0
$z_1 \approx z_0 + 0.02R_E$
$z_3 \approx z_0 + 0.04R_E$
$\{B_y \equiv 1\}$ Антисимм.
$z_4 \approx 0.15R_E$
$z_4 \approx 0.3R_E$
$z_5 \approx 0.586R_E$
$u_{\|} = (\mathbf{v}; \mathbf{b}) / V_{T0}$
$u_1 = (\mathbf{v}; \mathbf{h}_1) / V_{T0}$


$\int f\, dv_{\perp 1}$, $\{B_y \equiv 1\}$
z_0
$z_1 \approx z_0 + 0.02R_E$
$z_3 \approx z_0 + 0.04R_E$
$\{B_y \equiv 1\}$
$z_4 \approx 0.15R_E$
$z_4 \approx 0.3R_E$
$z_5 \approx 0.586R_E$
$u_{\parallel} = (\mathbf{v}; \mathbf{b}) / V_{T0}$
$u_2 = (\mathbf{v}; \mathbf{h}_2) / V_{T0}$
$u_2 = (\mathbf{v}; \mathbf{h}_2) / V_{T0}$
$u_2 = (\mathbf{v}; \mathbf{h}_2) / V_{T0}$


$\int f\, dv_{\|}$, Колокол. z_0
$z_1 \approx z_0 + 0.02 R_E$
$z_3 \approx z_0 + 0.04 R_E$
$B_y^E = 0$, $z_4 \approx 0.15 R_E$
$z_4 \approx 0.3 R_E$
$z_5 \approx 0.586 R_E$
$u_2 = (\mathbf{v}; \mathbf{h}_2)/V_{T0}$
$u_1 = (\mathbf{v}; \mathbf{h}_1)/V_{T0}$


$\int f\, dv_{\perp 2}$ Колокол.
z_0
$z_1 \approx 0.02 R_E$
$z_3 \approx 0.04 R_E$
$\{B_y^E = 0\}$ Колокол.
$z_4 \approx 0.15 R_E$
$z_4 \approx 0.3 R_E$
$z_5 \approx 0.586 R_E$
$u_{\parallel} = (\mathbf{v}; \mathbf{b}) / V_{T0}$
$u_1 = (\mathbf{v}; \mathbf{h}_1) / V_{T0}$


$\int f\, dv_{\perp 1}$ Колокол.
$z = 0$
$z_1 \approx 0.02 R_E$
$z_3 \approx 0.04 R_E$
$\{B_y^E = 0\}$ Колокол.
$z_4 \approx 0.15 R_E$
$z_4 \approx 0.3 R_E$
$z_5 \approx 0.586 R_E$
$u_{\parallel} = (\mathbf{v}; \mathbf{b}) / V_{T0}$
$u_2 = (\mathbf{v}; \mathbf{h}_2) / V_{T0}$