



Сибирское отделение Российской Академии наук
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им.Г.И. Будкера

*A.86
1998*

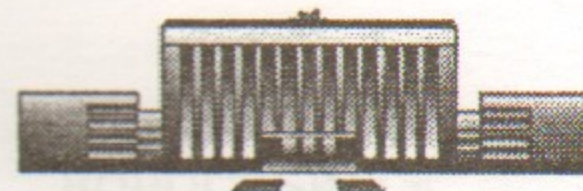
Г.А. Артин, Н.С. Бучельникова

**ВОЛНЫ БГК
И МОДУЛЯЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ
ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ХОЛОДНОГО
ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА С ПЛАЗМОЙ. III.**

ИЯФ 98-38

<http://www.inp.nsk.su/publications>

БИБЛИОТЕКА
Института ядерной
физики СО АН СССР
ИНВ. № *1213*



НОВОСИБИРСК

1998

Волны БГК и модуляционная неустойчивость при взаимодействии холодного электронного пучка с плазмой. III.

Г.А. Артин, Н.С. Бучельникова

Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН
630090 Новосибирск, Россия

Аннотация

Проведены численные эксперименты (метод частиц в ячейках) по исследованию неустойчивости холодного пучка электронов с параметрами $V_o/V_T = 15,9$; $n_b/n_o = (4 - 30) \cdot 10^{-2}$ в одномерной бесстолкновительной плазме с подвижными ионами в "короткой" системе $L = \lambda = 100r_d$.

Показано, что развитие пучковой неустойчивости сопровождается сателлитной и модуляционной неустойчивостью. При $n_b/n_o = (4 - 6) \cdot 10^{-2}$ модуляционная неустойчивость приводит к коллапсу, затуханию электрического поля и поглощению его энергии электронами плазмы. При $n_b/n_o = (10 - 30) \cdot 10^{-2}$ определяющую роль играет захват и ускорение электронов плазмы развивающейся при пучковой неустойчивости волной, что приводит к затуханию поля. Модуляционная неустойчивость развивается на остаточном поле и приводит к его затуханию.

Interaction of cold electron beam with plasma. BGK waves and modulational instability. III.

G.A. Artin, N.S. Buchelnikova

Budker Institute of Nuclear Physics
630090 Novosibirsk, Russia

Abstract

The instability of a cold electron beam ($V_o/V_T = 15,9$; $n_b/n_o \sim (4 - 30) \cdot 10^{-2}$) in onedimensional collisionless plasma with mobile ions in a "short" system ($L = \lambda = 100r_d$) was studied in numerical experiments (PIC-method).

It was shown, that the evolution of the beam-plasma instability is followed by the sideband instability and the modulational instability. If $n_b/n_o \sim (4 - 6) \cdot 10^{-2}$, the modulational instability leads to the collapse and to the absorption of the electric field energy by the plasma electrons. If $n_b/n_o \sim (10 - 30) \cdot 10^{-2}$, the trapping and the acceleration of the plasma electrons by the wave excited due to the beam-plasma instability leads to the damping of the field. The modulational instability leads to the damping of the residual field.

© Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН

В настоящей работе описаны численные эксперименты (метод частиц в ячейках) по исследованию неустойчивости холодного пучка электронов большой скорости $V_o \gg V_T$ в одномерной бесстолкновительной плазме с подвижными ионами в "короткой" системе $L = \lambda$. Работа является продолжением работ [1,2], в которых исследовалась неустойчивость пучка с плотностью — $n_b/n_o = 5 \cdot 10^{-3}$ [1] и $n_b/n_o = (1-2) \cdot 10^{-2}$ [2]. В настоящей работе исследуются пучки с плотностью $n_b/n_o \sim (4 - 30) \cdot 10^{-2}$.

В работах [1,2] показано, что пучковая неустойчивость приводит к развитию основной волны — гармоники с максимальным инкрементом. Нелинейная стадия пучковой неустойчивости определяется захватом электронов пучка возбуждающейся волной. При малом $n_b/n_o = 5 \cdot 10^{-3}$ [1] дальнейшее развитие неустойчивости приводит к формированию стационарной волны БГК-типа, устойчивой относительно сателлитной [3,4] и модуляционной неустойчивости. В случаях, рассмотренных в работе [2] одновременно с пучковой развивается сателлитная неустойчивость. Возбуждение гармоник-сателлитов приводит к модуляции волны и модуляционной неустойчивости. Развитие модуляционной неустойчивости приводит к затуханию волны в результате развития стохастической неустойчивости движения электронов плазмы [5]. Однако, полного затухания волны не происходит — после сброса части энергии затухание прекращается или замедляется и формируется волна БГК того же типа, что и в работе [1].

В настоящей работе рассматриваются пучки с большей плотностью, чем в работах [1,2]. Показано, что во всех случаях одновременно с пучковой неустойчивостью развивается сателлитная и модуляционная неустойчивость. При $n_b/n_o \sim (4 - 6) \cdot 10^{-2}$ развитие модуляционной неустойчивости приводит к коллапсу, разрушению формирующейся волны БГК, затуханию поля и поглощению его энергии электронами плазмы. При

$n_b/n_o \sim (10 - 30) \cdot 10^{-2}$ особенности развития пучковой и модуляционной неустойчивости определяются захватом возбуждающейся волной не только электронов пучка, но и электронов плазмы.

Численный эксперимент выполняется методом частиц в ячейках. Рассматривается одномерная система длиной $L/r_d = 100$ с периодическими граничными условиями. Для электронов и ионов плазмы задается максвелловское распределение по скоростям с $T_e/T_i = 30$, $M/m = 10^2$, обрзанное на скорости $V \sim \pm 2,8V_T$ из-за ограниченности числа счетных частиц ($N^e \sim 10^5$ на длине $100r_d$).

Задается холодный (монохроматический) пучок со скоростью $V_o/V_T = 15,9$. Для эффективного увеличения числа частиц пучка применяется метод "взвешивания", эквивалентный тому, что один электрон дробится на β частиц (b -электронов) с массой m/β и зарядом e/β , но с тем же отношением e/m , как у электрона.

Рассматривается четыре случая.

В случае 1-4 $n_b/n_o = 4 \cdot 10^{-2}$; число электронов пучка на длине $L/r_d = 100$ $N^b = 4 \cdot 10^3$; число "взвешенных" b -электронов $N^{b'} = 1 \cdot 10^4$; энергия электронов пучка $W_b^o/W_e^o = 10,375$ (W_e^o — тепловая энергия электронов плазмы).

В случае 1-5 $n_b/n_o = 6 \cdot 10^{-2}$; $N^b = 6 \cdot 10^3$; $N^{b'} = 1 \cdot 10^4$; $W_b^o/W_e^o = 15,562$.

В случае 1-6 $n_b/n_o = 10 \cdot 10^{-2}$; $N^b = 1 \cdot 10^4$; $N^{b'} = 1 \cdot 10^4$; $W_b^o/W_e^o = 25,936$.

В случае 1-7 $n_b/n_o = 30 \cdot 10^{-2}$; $N^b = 3 \cdot 10^4$; $N^{b'} = 3 \cdot 10^4$; $W_b^o/W_e^o = 77,809$.

Во всех случаях в начальный момент времени задается затравочная ленгмюровская волна малой амплитуды $E_o/(m r_d^2/e T_{oe}^2) = 1$ с длиной волны $\lambda/r_d = 100$, номером гармоники $N = L/\lambda = 1$ и фазовой скоростью $V_\phi/V_T = 16,1$.

В начальный момент задается 100 пробных частиц ($e = m = 0$, e/m то же, что у электрона) со скоростью, равной скорости электронов пучка $V_o/V_T = 15,9$, равномерно распределенных по длине системы. Прослеживается 18 траекторий пробных частиц на фазовой плоскости.

Подробности постановки и описания численного эксперимента приведены в работе [1].

Отметим, что в тексте и на рисунках поле E и амплитуда гармоник E^N нормируется на $m r_d^2/e T_{oe}^2$.

Рассмотрим случай 1-4: $L/r_d = 100$; $V_o/V_T = 15,9$; $n_b/n_o = 4 \cdot 10^{-2}$; $W_b^o/W_e^o = 10,4$ и случай 1-5: $L/r_d = 100$; $V_o/V_T = 15,9$; $n_b/n_o = 6 \cdot 10^{-2}$; $W_b^o/W_e^o = 15,6$.

На рис. 1 ÷ 7 показана зависимость от времени потерь энергии электронов пучка $\Delta W_b = -(W_b - W_b^o)$, энергии электрического поля W_E и энергии электронов плазмы $\Delta W_e = W_e - W_e^o$ (рис. 1,6), амплитуды гармоник поля E^N (рис. 2,3,7) и амплитуды гармоник возмущения плотности \tilde{n}^N (рис. 4,5) для случаев 1-4 (рис. 1 ÷ 4) и 1-5 (рис. 5 ÷ 7). Для случая 1-4 приведены также фазовые плоскости электронов (рис. 8), функции распределения по скорости электронов плазмы и пучка (b -электронов) (рис. 9), распределение поля $E(x)$, возмущения плотности плазмы $\tilde{n}(x)$ и возмущения плотности электронов пучка $\tilde{n}_b(x)$ (рис. 10), фазовые плоскости ионов (рис. 11), траектории электронов (пробных частиц) на фазовой плоскости (рис. 12 ÷ 15). На рис. 34 ÷ 37 показаны сравнительные рисунки для случаев 1-4 ÷ 1-7.

По кривым $W(t)$, $E^N(t)$ (рис. 1 ÷ 3,6,7) и фазовым плоскостям (рис. 8) видно, что в случаях 1-4 и 1-5 начальная стадия неустойчивости имеет тот же характер, что и в случаях 1-1 ÷ 1-3 [1,2]. Из рис. 2,3,7 видно, что с самого начала выделяется гармоника $N = 1$ с длиной волны $\lambda/r_d = 100 = L/r_d$. Нелинейная стадия неустойчивости определяется захватом электронов пучка (рис. 8). Первый максимум кривой $E^I(t)$ в случае 1-4 достигается в $t/T_{oe} \sim 5,3$, при этом $E_{max}^I \sim 73,2$; $V_{3max} = 2\sqrt{\frac{e\varphi_{max}}{m}} \sim 10,9V_T$; $W_{Emax} \sim 2,15W_e^o \sim 0,21W_b^o$; $\Delta W_{bmax} \sim 5,02W_e^o \sim 0,48W_b^o$; в случае 1-5 — $t/T_{oe} \sim 5,1$; $E_{max}^I \sim 89,3$; $V_{3max} \sim 12,0V_T$; $W_{Emax} \sim 3,35W_e^o \sim 0,22W_b^o$; $\Delta W_{bmax} \sim 8,11W_e^o \sim 0,52W_b^o$.

В обоих случаях, так же как в случаях 1-2, 1-3 [2], немного позже гармоники $N = 1$ начинает расти гармоника $N = 2$ (рис. 2,3,7), что свидетельствует о развитии сателлитной неустойчивости. Ранее для случая плазмы с неподвижными ионами было показано, что возмущение плотности пучка $\tilde{n}_b(x)$ при захвате приводит к появлению гармоник поля объемного заряда $N = 1, 2, 3, \dots$ [6]. Возмущение скорости электронов плазмы этими гармониками может привести к возбуждению ленгмюровских волн, которые послужат затравочными волнами для сателлитной неустойчивости. В работе [6] было показано, что гармоники поля объемного заряда начинают играть заметную роль при $\frac{n_b}{n_o} \geq (1 - 2) \cdot 10^{-2}$, так что этот эффект должен проявляться и в случаях, рассмотренных в настоящей работе.

В случае 1-4 гармоника $N = 2$ достигает максимальной амплитуды $E_{max}^{II} \sim 48,5$; $V_{3max}^{II} \sim 6,3V_T$; в $t/T_{oe} \sim 6,4$; в случае 1-5 — $E_{max}^{II} \sim 60,2$;

$V_{z\max}^{II} \sim 7,0V_T$; в $t/T_{oe} \sim 6,0$. По фазовым плоскостям случая 1-4 (рис. 8) видно, что в захвате электронов пучка участвуют обе гармоники — $N = 1$ и $N = 2$ — например, в $t/T_{oe} \sim 12$ верхняя граница скорости $V(x)$ b -электронов определяется гармоникой $N = 1$, нижняя гармоникой $N = 2$. Несколько позже сателлитная неустойчивость приводит к возбуждению гармоник $N = 3$ и 4 (рис. 2,3,7).

Так же, как в случаях 1-2, 1-3 [2] в районе областей захвата этих гармоник развивается сильная стохастическая неустойчивость движения b -электронов (подробнее см. [2]). Из-за больших амплитуд гармоник в случаях 1-4, 1-5 нижняя граница этой области близка к границе плазмы (рис. 8). В результате некоторая часть электронов плазмы (p -электронов) захватывается гармониками и ускоряется (рис. 8,9) в результате сильной стохастической неустойчивости в случае 1-4 в $t/T_{oe} \sim 12 - 14$, в случае 1-5 — уже в $t/T_{oe} \sim 4 - 6$. Это приводит к затуханию поля, небольшому в случае 1-4 (рис. 1) и несколько более значительному в случае 1-5 (рис. 6).

Сравнение рис. 1,2 и рис. 6,7 показывает, что в целом развитие неустойчивости в случаях 1-4 и 1-5 различается незначительно, поэтому мы рассмотрим подробнее только один случай 1-4.

Возбуждение гармоник-сателлитов приводит к модуляции поля, что видно по распределению поля $E(x)$ (рис. 10). Модуляция поля приводит к модуляционной неустойчивости в $t/T_{oe} > 10 - 15$ — в обоих случаях 1-4 и 1-5 начинают расти впадины плотности, что видно по распределению $\tilde{n}(x)$ (рис. 10) и по росту амплитуды гармоник \tilde{n}^N (рис. 4,5). При сильной стохастической неустойчивости p - и b -электроны обмениваются энергией с полем — ускоряющиеся частицы отбирают энергию у поля, тормозящиеся — отдают. В результате в случае 1-4 в $t/T_{oe} \sim 10 - 30$ энергия поля в среднем не меняется (рис. 1), практически не меняется и распределение $E(x)$ (рис. 10).

Рост возмущения плотности приводит к конверсии гармоник на возмущении [7,8], при которой генерируются более коротковолновые гармоники и обратные волны с номерами гармоник $N = N_e \pm \alpha N_i$, $\alpha = 1, 2, 3, \dots$. Модуляционная неустойчивость и конверсия приводят к концентрации поля во впадинах плотности. В случае 1-4 в $t_{max}/T_{oe} \sim 34$ максимальное значение поля $E_{max} \sim 95,0$, $E_{max}^2/8\pi n_o T \sim 2,81$. В $t/T_{oe} \sim 30 - 40$ начинается интенсивный захват электронов плазмы гармониками конверсии в области $V < 0$, возрастает и число p -электронов в области $V > 0$, что видно по фазовым плоскостям (рис. 8) и функциям распределения (рис. 9). В результате в $t > t_{max}$ поле быстро затухает, а энергия поля поглощается электронами плазмы (рис. 1). Такая же картина, но несколько

раньше — в $t/T_{oe} \sim 20 - 30$ — наблюдается и в случае 1-5 (рис. 6). Таким образом, в случаях 1-4 и 1-5 развитие модуляционной неустойчивости приводит к коллапсу.

Затухание происходит в результате сильной стохастической неустойчивости движения p -электронов в области скоростей $V > 0$ и $V < 0$. Можно оценить границы области стохастического движения p -электронов. Для случая 1-4 в области $V > 0$ за верхнюю границу можно принять максимальную скорость p -электронов — $V_{max}^e/V_T \sim 23,3$ (отметим, что максимальная скорость b -электронов $V_{max}^b/V_T \sim 26,4$), за нижнюю границу — минимальную скорость b -электронов — $V_{min}^b/V_T \sim -0,9$, так что ширина области стохастического движения $\delta V/V_T \sim 24,2(27,3)$. В области $V < 0$ за нижнюю границу можно принять минимальную скорость p -электронов $V_{min}^e/V_T \sim -10,6$, а верхнюю границу оценить по возмущению граничной скорости p -электронов на фазовой плоскости — $V/V_T \sim -1,9$, так что ширина области стохастического движения — $\delta V/V_T \sim 8,7$. Для случая 1-5 аналогичная оценка дает для области $V > 0$ — $V_{max}^e/V_T \sim 25,7$ ($V_{max}^b/V_T \sim 28,0$); $V_{min}^b/V_T \sim -0,9$; $\delta V/V_T \sim 26,6(28,9)$; для области $V < 0$ — $V_{min}^e/V_T \sim -12,0$; $V/V_T \sim -1,6$; $\delta V/V_T \sim 10,4$. Отметим, что в обоих случаях верхняя граница V больше фазовой скорости волны $N = 1$ ($V_{\phi}^I \leq V_o = 15,9V_T$), а нижняя граница $|V|$ больше фазовой скорости гармоники $N = -2$ — $|V| > |V_{\phi}^{II}|$, ($V_{\phi}^{II}/V_T \sim -8,2$), но меньше фазовой скорости гармоники $N = -1$ — $|V| < |V_{\phi}^I|$, ($V_{\phi}^I/V_T \sim -16,1$). Это показывает, что в сильной стохастической неустойчивости в области $V > 0$ участвуют все гармоники $N \geq 1$, а в области $V < 0$ — гармоники $N \geq |-2|$.

После затухания поля впадины плотности продолжают расти (рис. 10). В $t_{min}/T_{oe} \sim 47$ глубина впадины в случае 1-4 достигает величины $\tilde{n}_{min}/n_o \sim 0,49$. В $t > t_{min}$ впадины схлопываются. Это видно по фазовым плоскостям ионов (рис. 11). Из рис. 11 видно характерное возмущение скорости ионов модуляционной неустойчивостью ($t/T_{oe} \sim 40$) и схлопывание в результате встречи фронтов скорости ($t/T_{oe} \sim 60$), причем некоторое число ионов ускоряется. Дальнейшее развитие приводит к ионно-звуковой турбулентности ($t/T_{oe} \sim 100, 200$).

В $t/T_{oe} > 50$ затухание поля практически заканчивается. Как видно из рис. 1 и 6, потери энергии электронов пучка и энергия электронов плазмы в $t/T_{oe} > 40 - 50$ почти одинаковы и постоянны во времени. В случае 1-4 — $\Delta W_b \sim 2,7W_e^o \sim 0,26W_b^o$, в случае 1-5 — $\Delta W_b \sim 4,0W_e^o \sim 0,26W_b^o$. Практически не меняются и функции распределения электронов пучка и плазмы (рис. 9 и 37).

В работе [2] было показано, что в случае 1-3 ($n_b/n_o = 1 \cdot 10^{-2}$) в результате модуляционной неустойчивости также развивается коллапс, хотя и несколько позже (в $t/T_{oe} \sim 60 - 70$), чем в случаях 1-4, 1-5. Однако, в случае 1-3 коллапс не приводит к полному затуханию поля. После сброса волной $N = 1$ значительной части энергии сохраняются захваченные частицы и устанавливается волна БГК-типа малой амплитуды. В рассматриваемых случаях волна БГК-типа после коллапса четко не проявляется. Действительно, по распределению плотности электронов пучка $\tilde{n}_b(x)$ (рис. 10) видно, что в $t/T_{oe} > 40$ распределение плотности практически однородно. По функциям распределения электронов пучка (рис. 9) видно, что на $f_b(V)$ в $t/T_{oe} \geq 40$ нет выделенных пиков — распределение по скорости в широком диапазоне практически однородно.

Анализ восемнадцати траекторий на фазовой плоскости b -электронов (пробных частиц) в случае 1-4 показывает, что все они, кроме одной (частица 1), имеют характер стохастических. Типичные траектории приведены на рис. 12 ÷ 15, где показаны траектории в лабораторной системе в $t/T_{oe} \sim 0 - 200$ (рис. 12а ÷ 15а) и в системе той или иной гармоники в выбранных интервалах времени. Траектория частицы 1 (рис. 12) показывает, что эта частица, совершив один оборот в волне $N = 1$, становится пролетной, но вскоре снова захватывается (рис. 12б) и остается захваченной даже в $t/T_{oe} > 40$, когда поле затухает. В $t/T_{oe} \sim 100$ она выходит из захвата и становится пролетной (рис. 12 а,в). То, что частица 1 захвачена в $t/T_{oe} \sim 40 - 100$, показывает, что волна БГК-типа $N = 1$, возможно, все-таки существует после затухания, но имеет малую амплитуду и дает малое возмущение $\tilde{n}_b(x)$, $f_b(V)$. Параметры траектории частицы 1 перед выходом из захвата в $t/T_{oe} \sim 100$ ($\Delta V_{max}/V_T \sim 2,5$, $\Delta x_{max}/r_d \sim 83$) позволяют оценить амплитуду волны: в предположении, что $\Delta V_{max} \sim 2V_s \sim 2,5V_T - E^I \sim 1$.

Траектории частиц 2 ÷ 4 (рис. 13 ÷ 15) показывают, что стохастические явления продолжаются и после затухания поля в $t/T_{oe} > 40$. Так частица 2 (рис. 13) вначале привязана к гармонике $N = 1$ — она то захватывается, то выходит из захвата, то захватывается снова (рис. 13б), но в $t/T_{oe} > 33$ переходит в сферу влияния гармоники $N = 3$ (рис. 13в), периодически то отражаясь, то становясь пролетной. Частица 3 (рис. 14) вначале тоже привязана к гармонике $N = 1$ (рис. 14б), но в $t/T_{oe} \sim 25 - 50$ захватывается гармоникой $N = 3$ (рис. 14в), а позже переходит в сферу влияния $N = 4$ (рис. 14г). Частица 4 (рис. 15) вначале привязана к $N = 1$, в $t/T_{oe} \sim 20 - 50$ — к $N = 2$ (рис. 15б), в $t/T_{oe} \sim 50 - 100$ — к $N = 5$ (рис. 15в), в $t/T_{oe} > 100$ продолжает замедляться и в $t/T_{oe} \sim 150 - 200$ захватывается гармоникой $N = 10$ (рис. 15г).

По фазовым плоскостям (рис. 8), функциям распределения (рис. 9), и $\tilde{n}_b(x)$ (рис. 10) видно, что сильная стохастическая неустойчивость приводит к “размешиванию” b и p -электронов на фазовой плоскости и примерно равномерному заполнению ее. Естественно предположить, что подобно случаю 1-3 [2] при затухании поля гармоники не затухают полностью, но уменьшают свою амплитуду и сохраняются как волны БГК-типа малой амплитуды, области захвата которых заполнены электронами. Существование таких волн и позволяет частицам дрейфовать по фазовой плоскости, попадая в сферу влияния (в стохастический слой) то одной, то другой гармоники.

Рассмотрим случай 1-6: $L/r_d = 100$; $V_o/V_T = 15,9$; $n_b/n_o = 10 \cdot 10^{-2}$; $W_b^o/W_e^o = 25,9$ и случай 1-7: $L/r_d = 100$; $V_o/V_T = 15,9$; $n_b/n_o = 30 \cdot 10^{-2}$; $W_b^o/W_e^o = 77,8$.

На рис. 16 ÷ 18 и 25 ÷ 27 показана зависимость от времени потерь энергии электронов пучка ΔW_b , энергии поля W_E и энергии электронов плазмы ΔW_e (рис. 16,25), амплитуды гармоник поля E^N (рис. 17,26) и амплитуды гармоник возмущения плотности \tilde{n}^N (рис. 18,27), распределение поля $E(x)$ и возмущения плотности плазмы (рис. 19,28), фазовые плоскости электронов (рис. 20,30) и ионов (рис. 22,29), функции распределения по скорости электронов плазмы и пучка (b -электронов) (рис. 21,31), траектории электронов (пробных частиц) на фазовой плоскости (рис. 23, 24, 32, 33) для случаев 1-6 (рис. 16 ÷ 24) и 1-7 (рис. 25 ÷ 33). На рис. 34 ÷ 37 показаны сравнительные рисунки для случаев 1-3 ÷ 1-7: фазовые плоскости ионов (рис. 34) и $E(x)$, $\tilde{n}(x)$ (рис. 35) в моменты времени, когда E_m (максимальное значение $E(x)$) достигает первого максимума, и функции распределения в $t/T_{oe} = 200$ (рис. 36,37).

По кривым $W(t)$, $E^I(t)$ (рис. 16,17,25,26) видно, что в случаях 1-6, 1-7 амплитуда волны $N = 1$ быстро нарастает, с небольшим отставанием растут амплитуды гармоник $N = 2, 3, \dots$. По фазовым плоскостям электронов (рис. 20,30) видно, что почти одновременно с захватом электронов пучка начинают захватываться электроны плазмы — в случае 1-6 — в $t/T_{oe} \sim 4 - 5$, в случае 1-7 — в $t/T_{oe} \sim 2 - 3$. С увеличением n_b/n_o число захватываемых p -электронов возрастает, что видно по функциям распределения в $t/T_{oe} \sim 6$ (рис. 21,31). Захват и ускорение p -электронов приводят к быстрому — за несколько периодов T_{oe} — затуханию поля (рис. 16,25). При этом заметная часть b -электронов остается в области малых скоростей (рис. 21,31). Первый максимум кривой $E^I(t)$ в случае 1-6 достигается в $t/T_{oe} \sim 4,8$, при этом $E_{max}^I \sim 105,5$; $V_{s,max} \sim 13,0V_T$; $W_{E,max} \sim 5,84W_e^o \sim 0,23W_b^o$; $\Delta W_{b,max} \sim 14,71W_e^o \sim 0,57W_b^o$; в случае

1-7 — $t/T_{oe} \sim 2,8$; $E_{max}^I \sim 120,6$; $V_{3max} \sim 13,9V_T$; $W_{Emax} \sim 14,94W_e^o \sim 0,19W_b^o$; $\Delta W_{bmax} \sim 54,22W_e^o \sim 0,70W_b^o$.

Практически одновременно с ростом гармоники $N = 1$ развивается сателлитная неустойчивость — растут гармоники $N = 2,3...$ (рис. 17,26). В случае 1-6 гармоника $N = 2$ достигает максимальной амплитуды $E_{max}^{II} \sim 90,3$; $V_{3max}^{II} \sim 8,5V_T$; в $t/T_{oe} \sim 4,0$; в случае 1-7 — $E_{max}^{II} \sim 160$; $V_{3max}^{II} \sim 11,4V_T$; в $t/T_{oe} \sim 3,2$.

В районе областей захвата волны $N = 1$ и гармоник-сателлитов развивается сильная стохастическая неустойчивость движения электронов, в которой участвуют и b - и p -электроны это приводит к быстрому “размещиванию” электронов — фазовая плоскость уже к $t/T_{oe} \sim 20$ почти равномерно заполняется электронами (рис. 20,30). Оценка границ области стохастического движения, подобная случаям 1-4, 1-5, дает для случая 1-6 $V_{max}^e/V_T \sim 29,3$ ($V_{max}^b/V_T \sim 29,7$); $V_{min}^b/V_T \sim -2,3$; $\delta V/V_T \sim 31,6(32,0)$; для случая 1-7 — $V_{max}^e/V_T \sim 35,1$ ($V_{max}^b/V_T \sim 38,2$); $V_{min}^b/V_T \sim -10,2$; $\delta V/V_T \sim 45,3(48,4)$.

Быстрый рост амплитуды волны $N = 1$ и гармоник-сателлитов уже на начальной стадии приводит к модуляции поля. Максимальное значение $E(x) - E_m$ достигает максимума в t , близкое к t максимума энергии поля — в случае 1-6 — $t/T_{oe} \sim 4,2$; $E_{max} \sim 212,1$; $E_{max}^2/8\pi n_o T \sim 14,3$; в случае 1-7 — $t/T_{oe} \sim 3,3$; $E_{max} \sim 390,9$; $E_{max}^2/8\pi n_o T \sim 48,8$. Нарастающее поле приводит к возмущению скорости ионов и возмущению плотности плазмы. Это видно по фазовым плоскостям ионов (рис. 34) и распределению $E(x)$, $\tilde{n}(x)$ (рис. 35) при сравнении случаев 1-4 ÷ 1-7. Действительно, из рис. 34,35 видно, что E_{max} , возмущение скорости и плотности возрастают с ростом n_b/n_o , достигая в случаях 1-6, 1-7 значительной величины.

Захват электронов плазмы, как уже говорилось, приводит к затуханию поля (рис. 16,25). Поле, однако, не затухает до конца. На остаточном поле развивается модуляционная неустойчивость, что видно по росту впадин плотности (рис. 19,28) и росту амплитуды гармоник \tilde{n}^N (рис. 18,27).

Рост возмущения плотности приводит к конверсии и возбуждению коротковолновых гармоник и обратных волн. В результате в случае 1-6 в $t/T_{oe} \geq 20$, в случае 1-7 уже в $t/T_{oe} \geq 6 - 10$ начинается интенсивный захват электронов плазмы в области $V < 0$. Это видно по фазовым плоскостям электронов (рис. 20,30) и функциям распределения (рис. 21,31).

В районе областей захвата гармоник конверсии — обратных волн развивается сильная стохастическая неустойчивость движения p -электронов. Границы области стохастического движения в области $V < 0$ можно

оценить по минимальной скорости p -электронов V_{min}^e и по возмущению граничной скорости p -электронов на фазовой плоскости. Для случая 1-6 это дает $V_{min}^e/V_T \sim -11,8$; $V/V_T \sim -1,2$, так что ширина области $\delta V/V_T \sim 10,6$. Для случая 1-7 — $V_{min}^e/V_T \sim -15,4$; $V/V_T \sim -0,4$, так что ширина области $\delta V/V_T \sim 15$. Отметим, что в обоих случаях $|V_{min}^e|$ больше фазовой скорости гармоники $N = -2$ — ($V_{\phi}^{II}/V_T \sim -8,2$), но меньше фазовой скорости гармоники $N = -1$ — ($V_{\phi}^I/V_T \sim -16,1$). Это показывает, что в стохастической неустойчивости участвуют гармоники $N \geq |-2|$, но не участвует $N = -1$.

Ускорение p -электронов при стохастической неустойчивости приводит к затуханию поля (рис. 16,19,25,28). К $t/T_{oe} \sim 30$ в случае 1-6 и $t/T_{oe} \sim 20$ в случае 1-7 поле затухает, а энергия поля поглощается электронами плазмы. В дальнейшем ΔW_b и ΔW_e не меняются и остаются практически одинаковыми (рис. 16,25). Это показывает, что почти вся энергия, потерянная пучком поглощается электронами плазмы. В случае 1-6 — $\Delta W_b \sim 10,3W_e^o \sim 0,40W_b^o$, в случае 1-7 — $\Delta W_b \sim 41,6W_e^o \sim 0,53W_b^o$. Практически не меняются и функции распределения электронов пучка и плазмы (рис. 21,31,36,37).

Впадины плотности в случае 1-6 достигают максимальной величины $\tilde{n}_{min}/n_o \sim 0,31$ после затухания поля в $t_{min}/T_{oe} \sim 34$ (рис. 19), а в случае 1-7 — еще на стадии затухания — $t_{min}/T_{oe} \sim 9,5$; $\tilde{n}_{min}/n_o \sim 0,51$ (рис. 28). После этого впадины схлопываются, что видно по фазовым плоскостям ионов (рис. 22,29). В случае 1-6, так же как в случаях 1-4, 1-5 развивается мелкомасштабная ионно-звуковая турбулентность (рис. 19,22).

Анализ фазовых плоскостей ионов (рис. 29) и распределения плотности (рис. 28) в случае 1-7 показывает, что в этом случае образуется долгоживущий ионно-звуковой солитон [9]. Действительно, уже в самом начале в $t/T_{oe} \sim 3,3$ возникает возмущение скорости и скоррелированное с ним возмущение плотности ионов (рис. 34,35). В дальнейшем оба эти возмущения сохраняются, медленно затухая (рис. 28,29). Анализ более мелкомасштабных возмущений скорости и плотности ионов показывает, что они возникают после схлопывания впадин плотности. Эти возмущения скорости и плотности также скоррелированы и сохраняются в течение длительного времени (рис. 28,29). Это показывает, что они также являются ионно-звуковыми солитонами. Анализ фазовых плоскостей ионов и распределения плотности $\tilde{n}(x)$ в случаях 1-2 [2], 1-3 ÷ 1-5 показывает, что такие же структуры возникают после схлопывания впадин плотности на стадии ионно-звуковой турбулентности и в этих случаях.

Отметим, что на стадии развития ионно-звуковой турбулентности некоторое число ионов захватывается и ускоряется ионно-звуковыми волнами до скоростей $V/V_{Ti} \sim \pm(10-15)$. Однако, энергия, поглощенная ионами, невелика, что видно из таблицы для случаев 1-3÷1-7 в $t/T_{oe} = 200$.

Случай	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7
n_b/n_o	$2 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$10 \cdot 10^{-2}$	$30 \cdot 10^{-2}$
$\Delta W_i/W_e^o$	$3,2 \cdot 10^{-2}$	$5,2 \cdot 10^{-2}$	$4,5 \cdot 10^{-2}$	$7,1 \cdot 10^{-2}$	$28,4 \cdot 10^{-2}$
$\Delta W_i/W_b^o$	$6,2 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$
$\Delta W_b/W_e^o$	1,6	2,7	4,0	10,3	41,6
$\Delta W_b/W_b^o$	0,31	0,26	0,26	0,40	0,53
$\Delta W_i/\Delta W_b$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$6,9 \cdot 10^{-3}$	$6,8 \cdot 10^{-3}$

Анализ траекторий b -электронов (пробных частиц) на фазовой плоскости в случаях 1-6 и 1-7 показывает, что все рассмотренные траектории являются стохастическими, причем стохастические явления продолжаются и после затухания поля. Типичные траектории показаны на рис. 23,24,32,33, где приведены траектории в лабораторной системе в $t/T_{oe} \sim 0 - 200$ и в системе той или иной гармонике в выбранном интервале времени. Траектории частиц 1 и 2 в случае 1-6 (рис. 23,24) показывают, что эти частицы привязаны к гармонике $N = 1$ — они то захватываются, то выходят из захвата, причем эти явления продолжаются и в $t/T_{oe} > 30$ после затухания поля. Особенно показательна частица 2, которая захватывается в $t/T_{oe} \sim 100, \sim 150$ и даже ~ 200 (рис. 24в). Частица 3 в случае 1-7 (рис. 32) вначале привязана к $N = 1$, но вскоре переходит в сферу влияния гармонике $N = 2$, где и остается, захватываясь и выходя из захвата даже незадолго до $t/T_{oe} \sim 200$ (рис. 32г). Частица 4 (рис. 33), начинает с волны $N = 1$, в $t/T_{oe} > 100$ переходит в сферу влияния гармонике $N = 3$, а в $t/T_{oe} > 140$ — гармонике $N = 4$ (рис. 33в,г).

Таким образом, траектории b -электронов в случаях 1-6, 1-7 подтверждают предположение, сделанное при анализе траекторий в случае 1-4, о том, что после затухания поля сохраняются гармонике малой амплитуды, имеющие характер волн БГК-типа. Отметим, что возможность существования незатухающих волн БГК-типа малой амплитуды в одномерной максвелловской плазме показана в численном эксперименте [10].

Литература

- [1] Г.А.Артин, Н.С.Бучельникова. — Волны БГК и модуляционная неустойчивость при взаимодействии холодного электронного пучка с плазмой. I. Препринт ИЯФ N 98-36, Новосибирск, 1998.
- [2] Г.А.Артин, Н.С.Бучельникова. — Волны БГК и модуляционная неустойчивость при взаимодействии холодного электронного пучка с плазмой. II. Препринт ИЯФ N 98-37, Новосибирск, 1998.
- [3] Н.Г.Мациборко, И.Н.Онищенко, Я.Б.Файнберг, В.Д.Шапиро, В.И.Шевченко. — ЖЭТФ 63, 874, 1972.
- [4] Г.А.Артин, Н.С.Бучельникова, Б.Н.Лазеев. — Волна Бернштейна-Грина-Крускала в длинной системе. Неустойчивость сателлитов. I, II. Препринты ИЯФ N 95-23, N 95-24, Новосибирск, 1995.
- [5] N.S.Buchelnikova, E.P.Matochkin. — Phys. Lett 112A, 330, 1985.
- [6] В.Т.Астрелин, Н.С.Бучельникова. — ЖТФ 46, N 8, 1644, 1976.
- [7] P.K.Kaw, A.T.Lin, J.M.Dawson. — Phys. Fluids 16, 1967, 1973.
- [8] N.S.Buchelnikova, E.P.Matochkin. — Physica Scripta 24, 566, 1981.
- [9] Ф.Чен. — Введение в физику плазмы, стр. 317-321, Москва, Мир, 1987.
- [10] J.Demeio, J.P.Holloway. — J.Pl.Phys. 46, Pt1, 63, 1991.

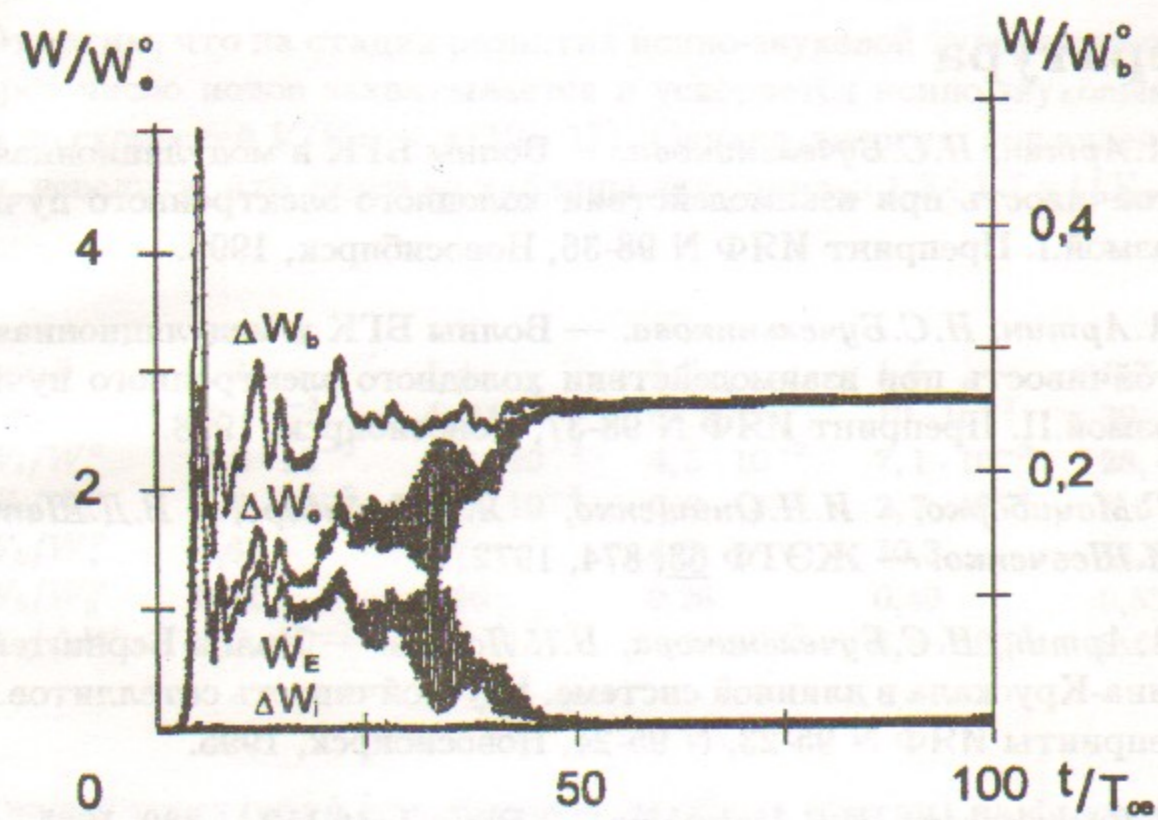


Рис. 1: Зависимость от времени энергии поля W_E , энергии электронов плазмы $\Delta W_e = W_e - W_e^0$, и потерь энергии электронов пучка $\Delta W_b = -(W_b - W_b^0)$. Случай 1-4.

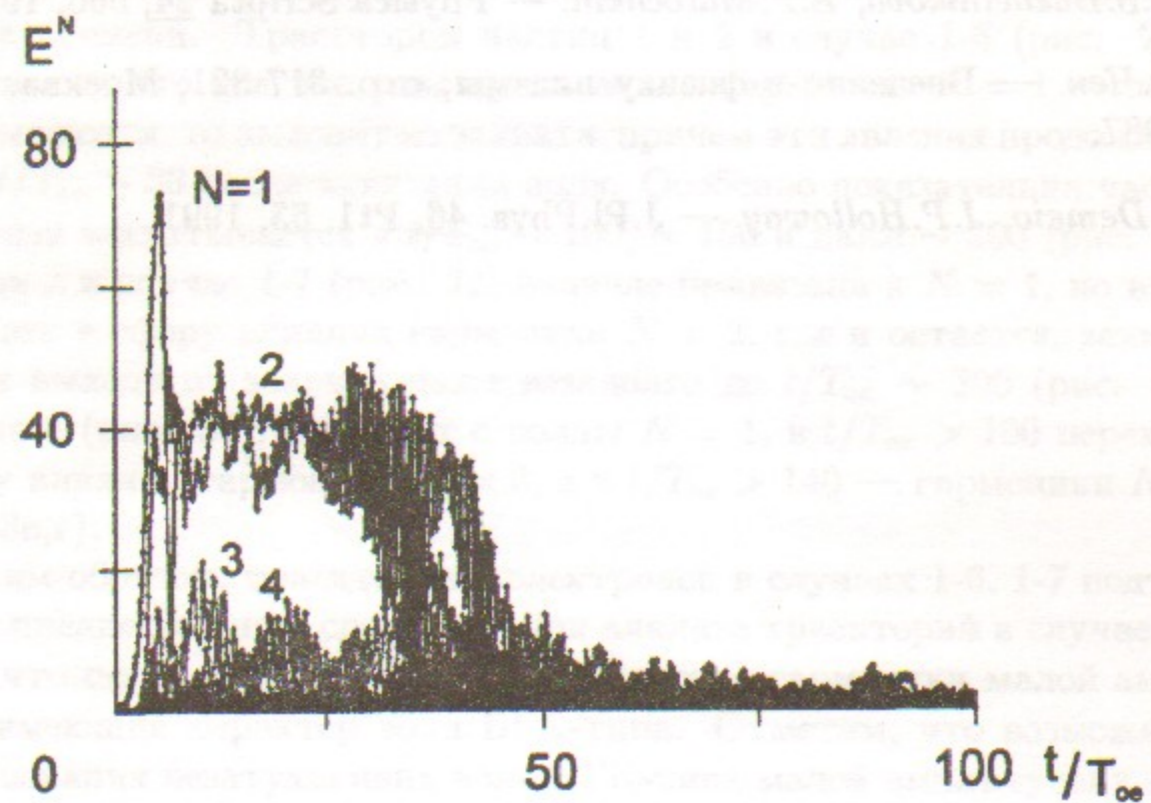


Рис. 2: Зависимость от времени амплитуды волны $N = 1$ и гармоник $N = 2 \div 10$. Случай 1-4.

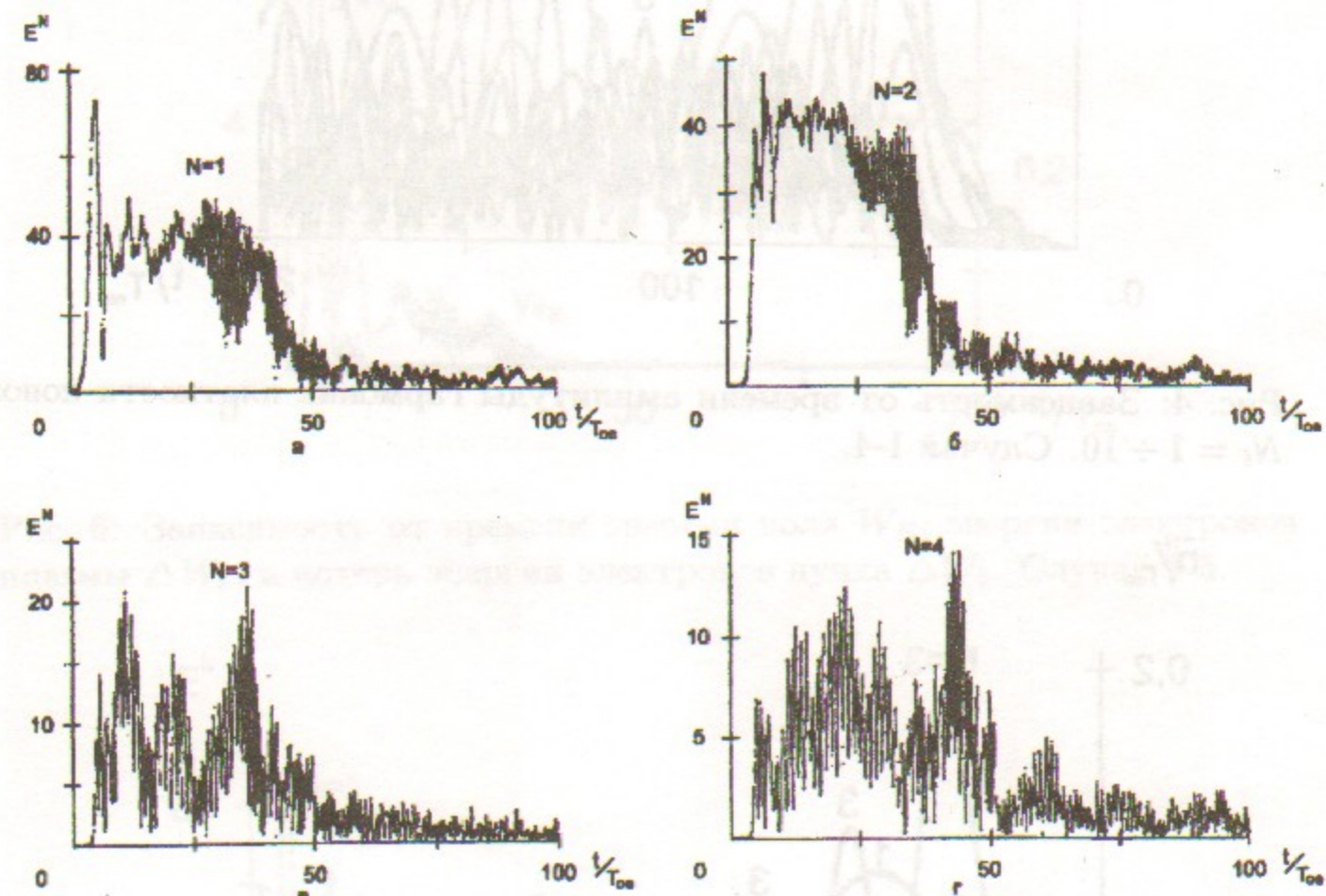


Рис. 3: Зависимость от времени амплитуды волны $N = 1$ и гармоник $N = 2 \div 4$. Случай 1-4. а. $N = 1$, б. $N = 2$, в. $N = 3$, г. $N = 4$.

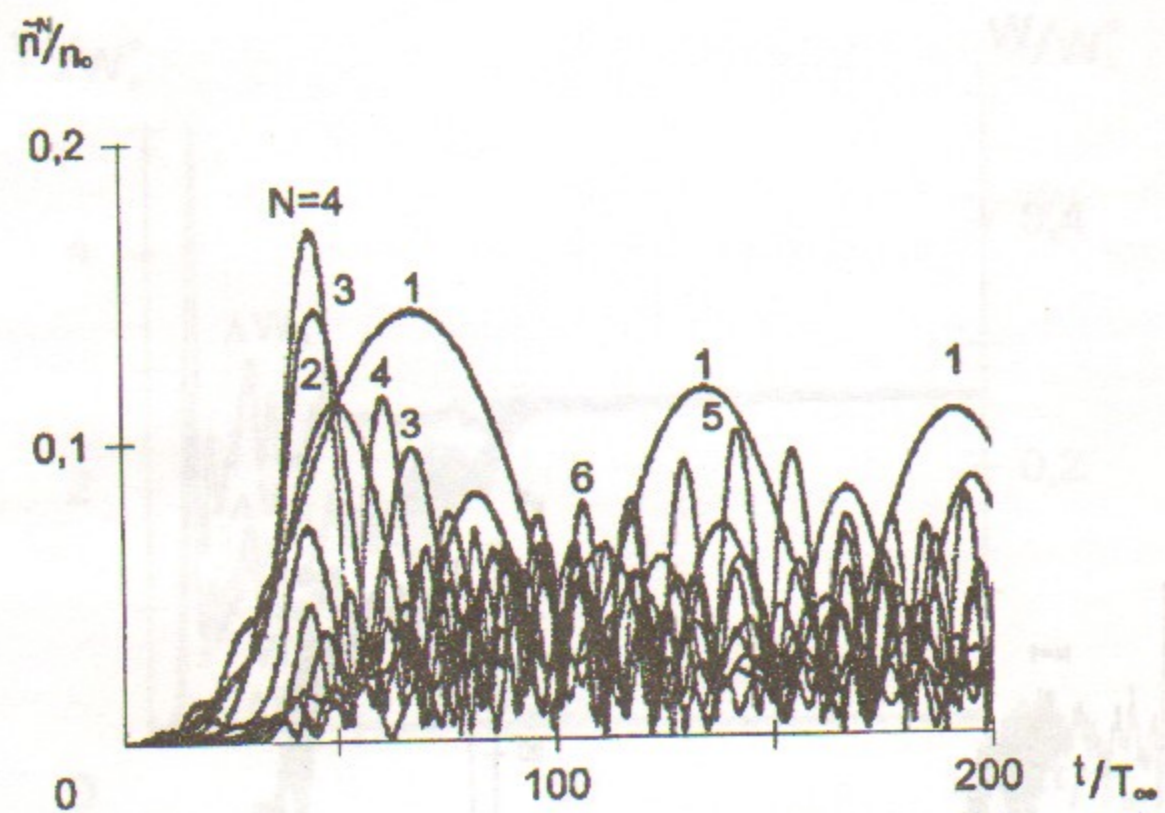


Рис. 4: Зависимость от времени амплитуды гармоник плотности ионов $N_i = 1 \div 10$. Случай 1-4.

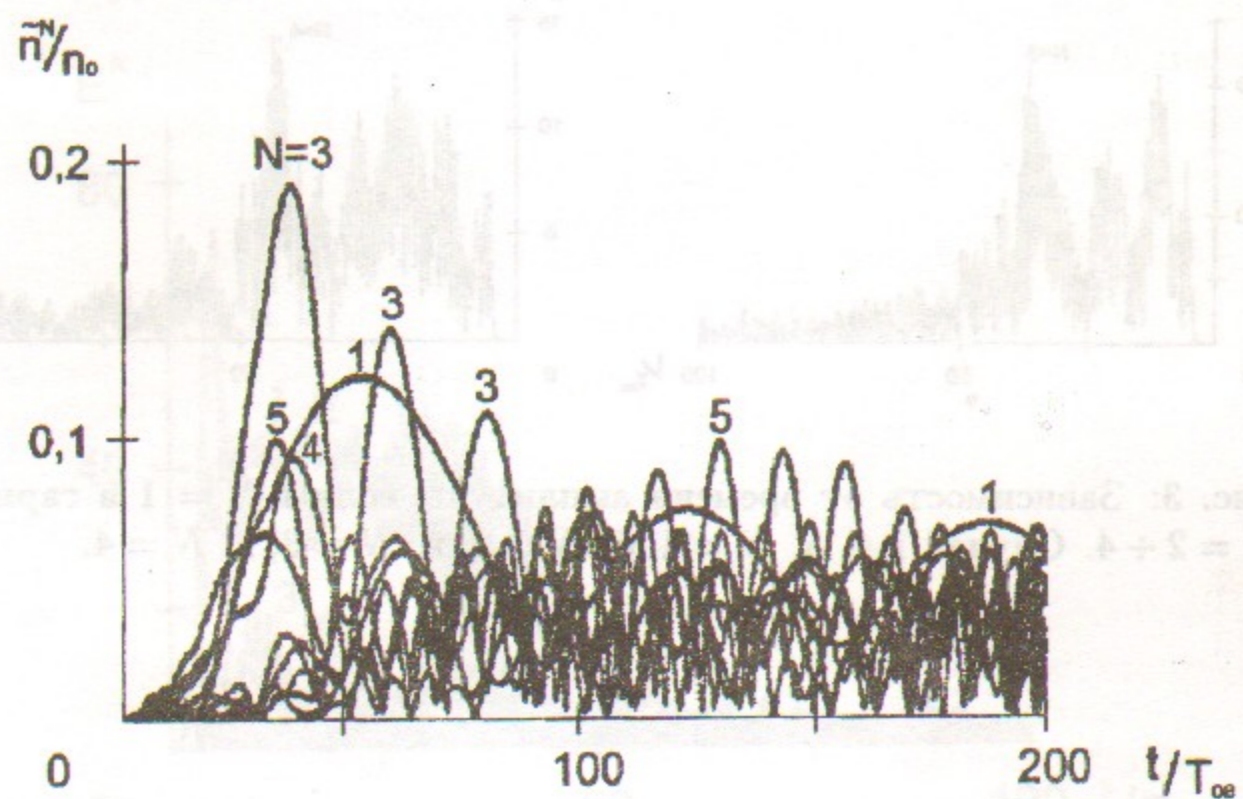


Рис. 5: Зависимость от времени амплитуды гармоник плотности ионов $N_i = 1 \div 10$. Случай 1-5.

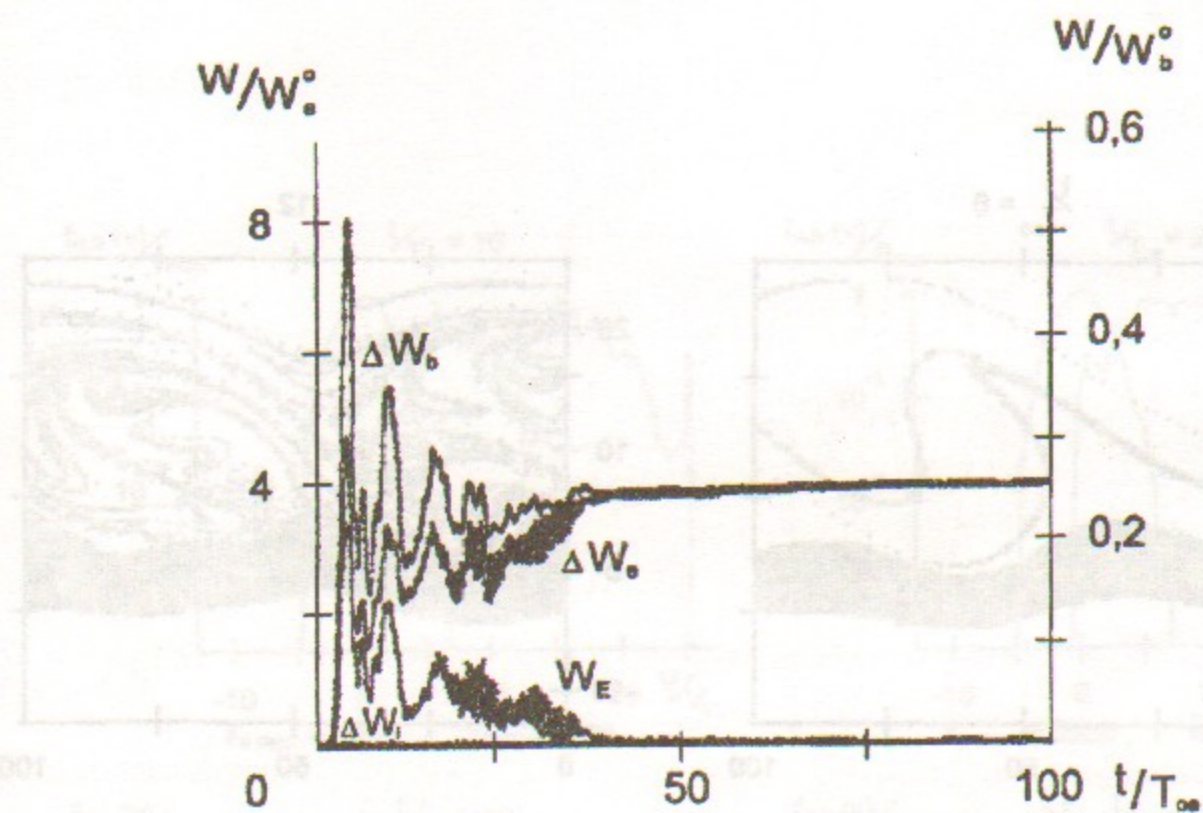


Рис. 6: Зависимость от времени энергии поля W_E , энергии электронов плазмы ΔW_e , и потерь энергии электронов пучка ΔW_b . Случай 1-5.

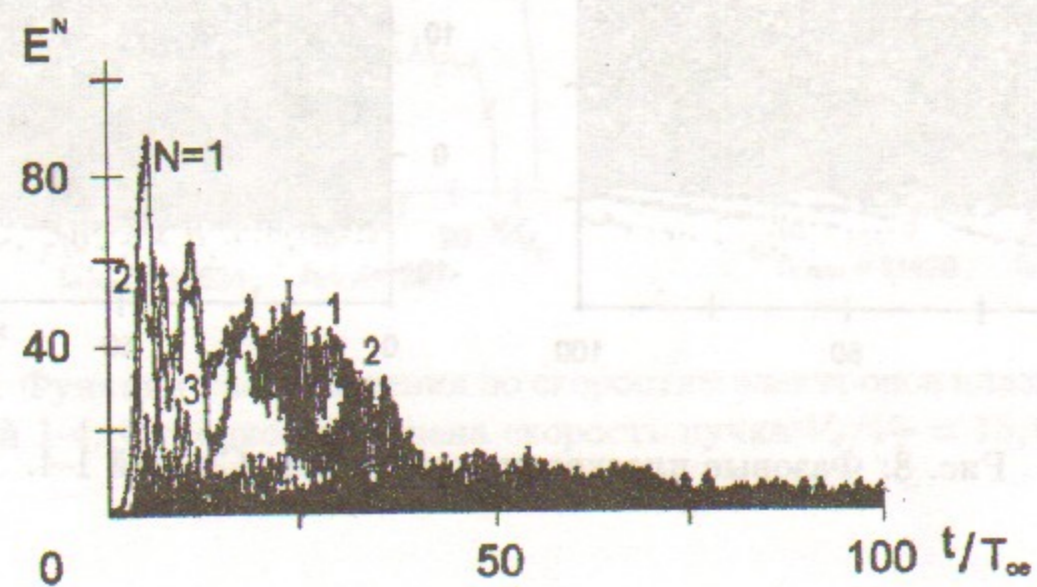


Рис. 7: Зависимость от времени амплитуды волны $N = 1$ и гармоник $N = 2 \div 10$. Случай 1-5.

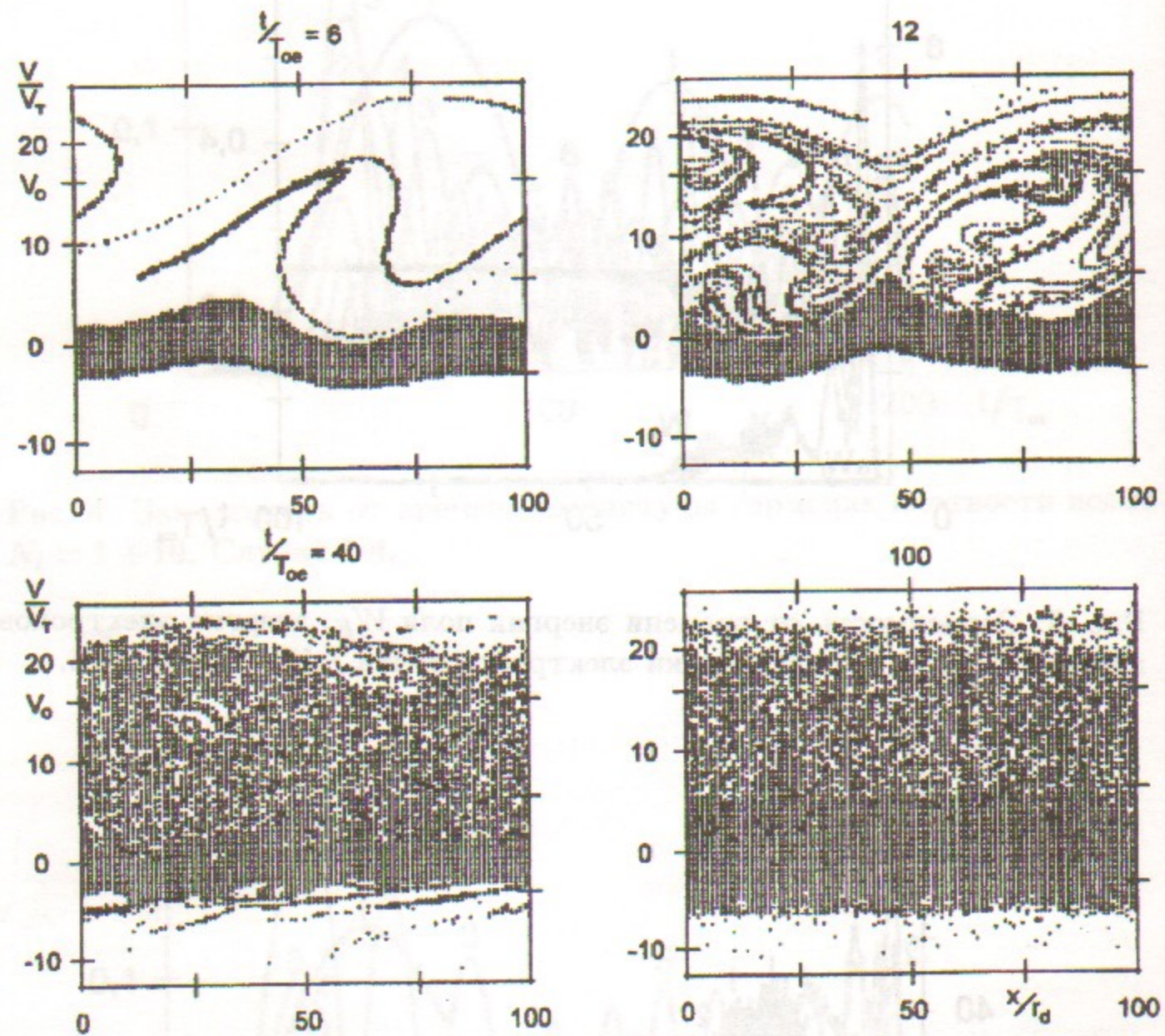


Рис. 8: Фазовые плоскости электронов. Случай 1-4.

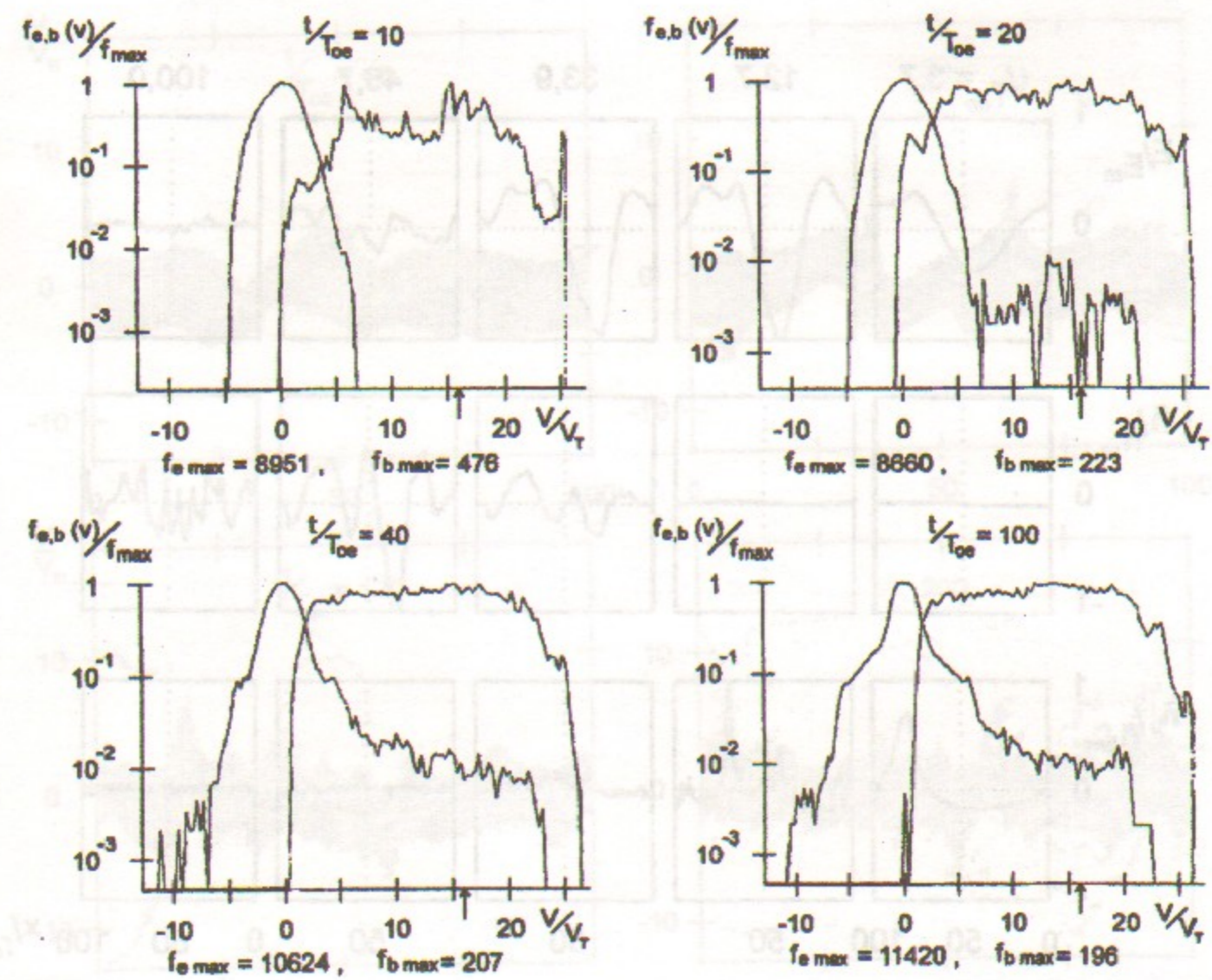


Рис. 9: Функции распределения по скоростям электронов плазмы и пучка. Случай 1-4. Стрелкой отмечена скорость пучка $V_o/V_T = 15,9$.

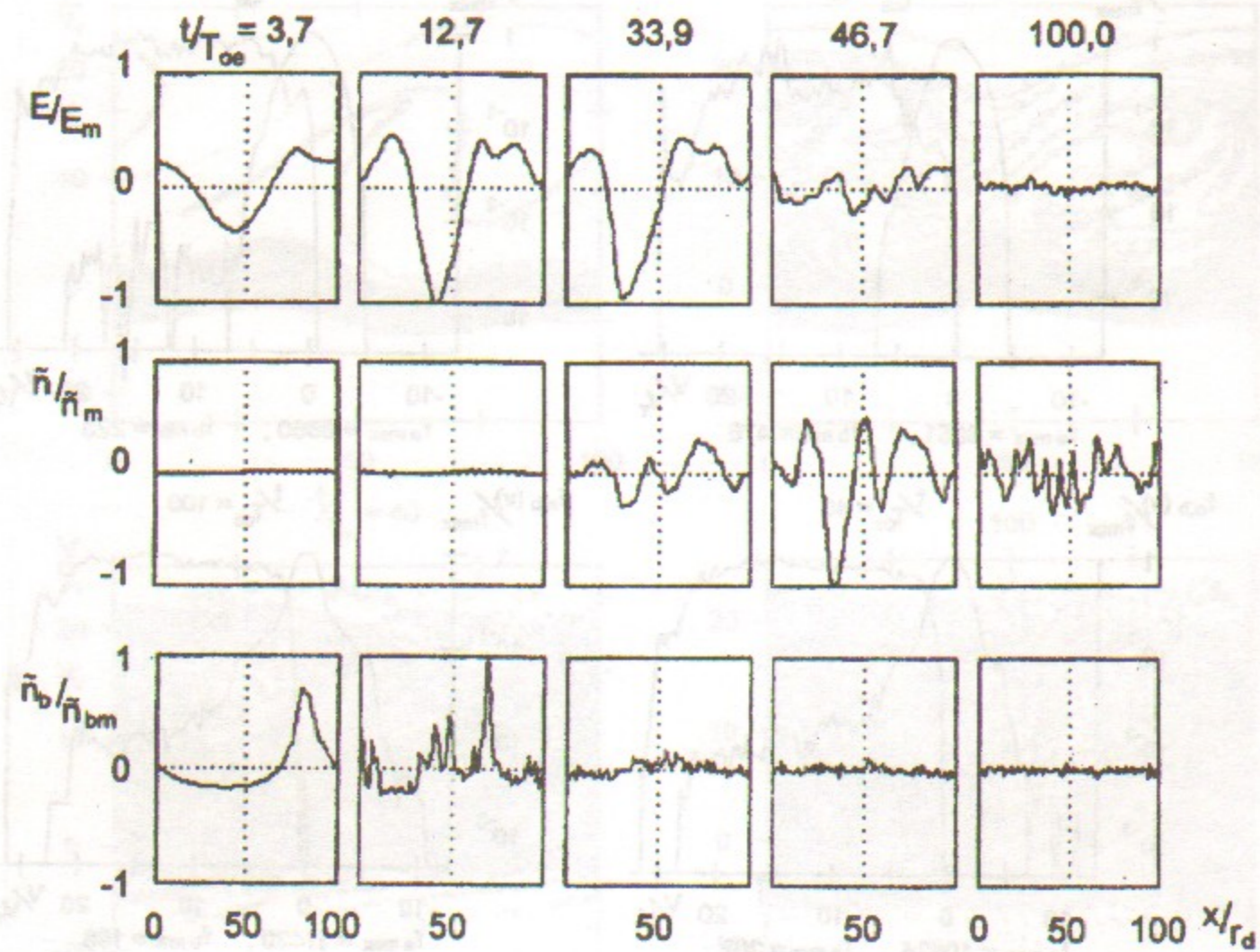


Рис. 10: Распределение поля $E(x)$, возмущения плотности плазмы $\tilde{n}(x)$ и возмущения плотности электронов пучка $\tilde{n}_b(x)$. Случай 1-4. $E_m = 99,43$, $\tilde{n}_m/n_o = 0,49$, $\tilde{n}_{bm}/n_b^o = 2,98$.

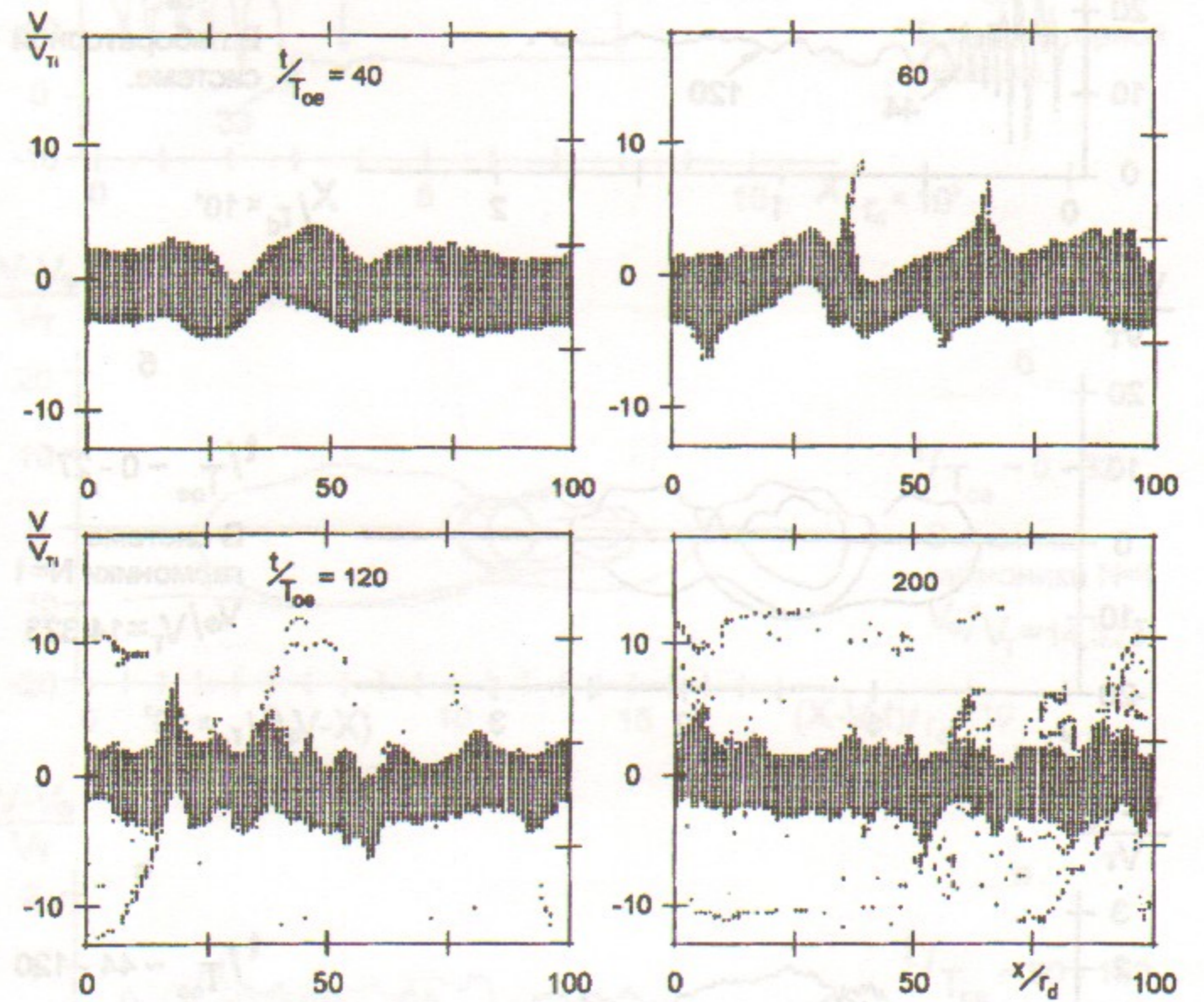


Рис. 11: Фазовые плоскости ионов. Случай 1-4.

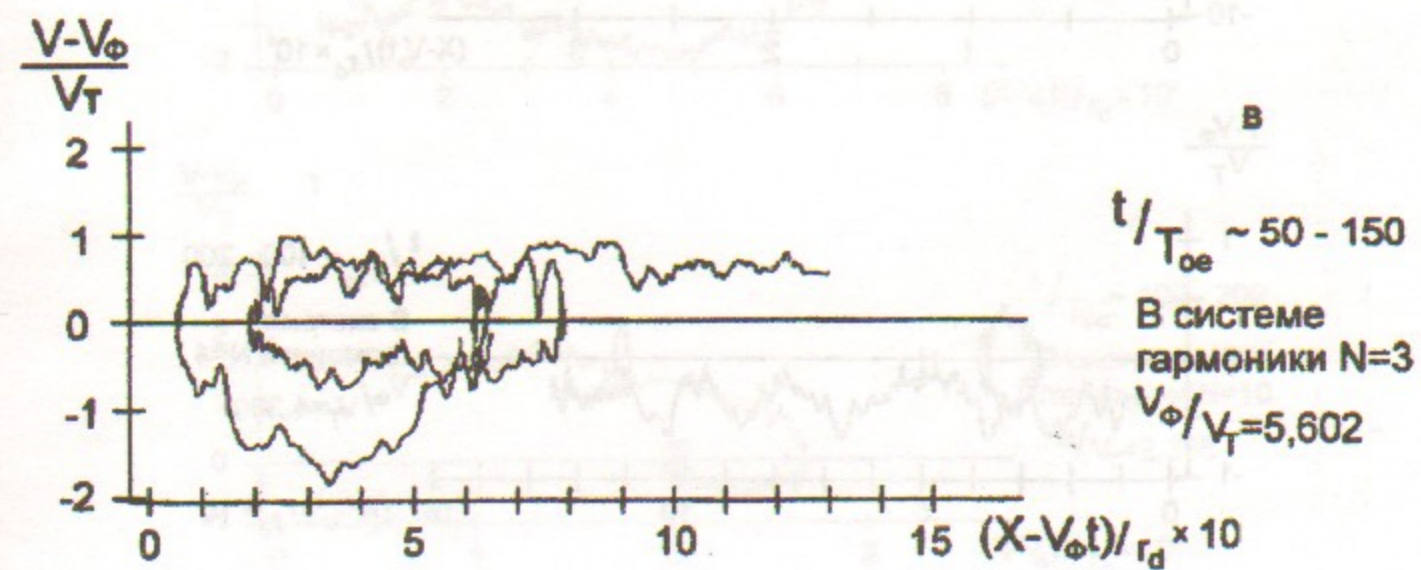
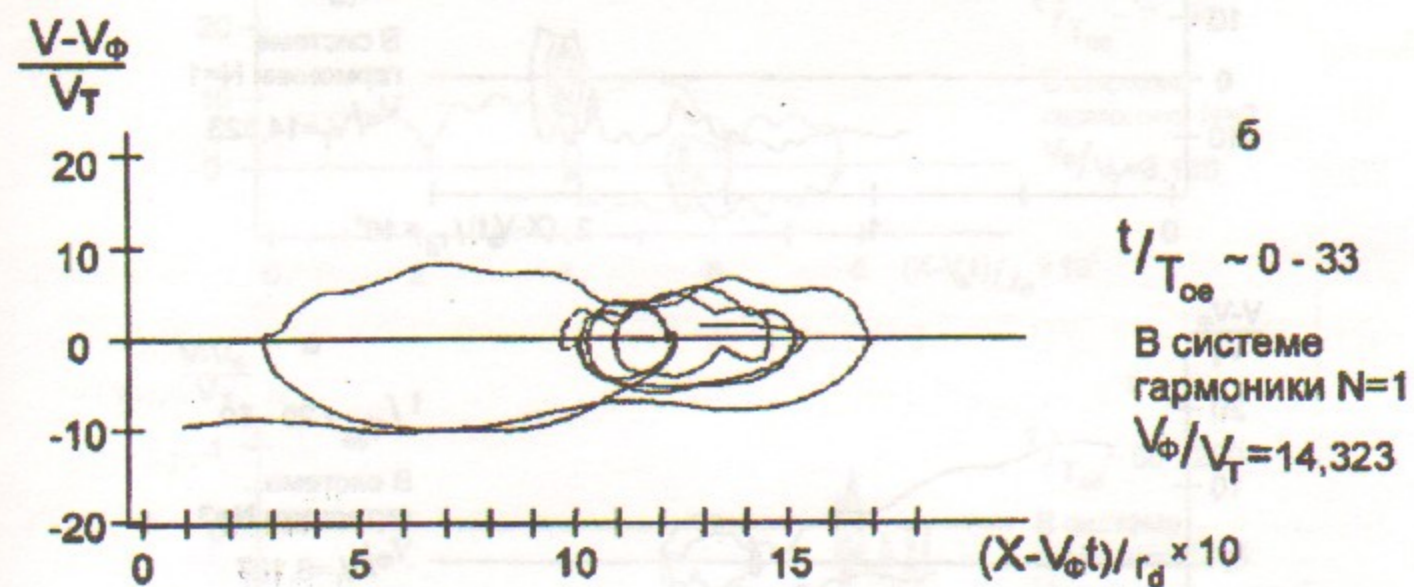
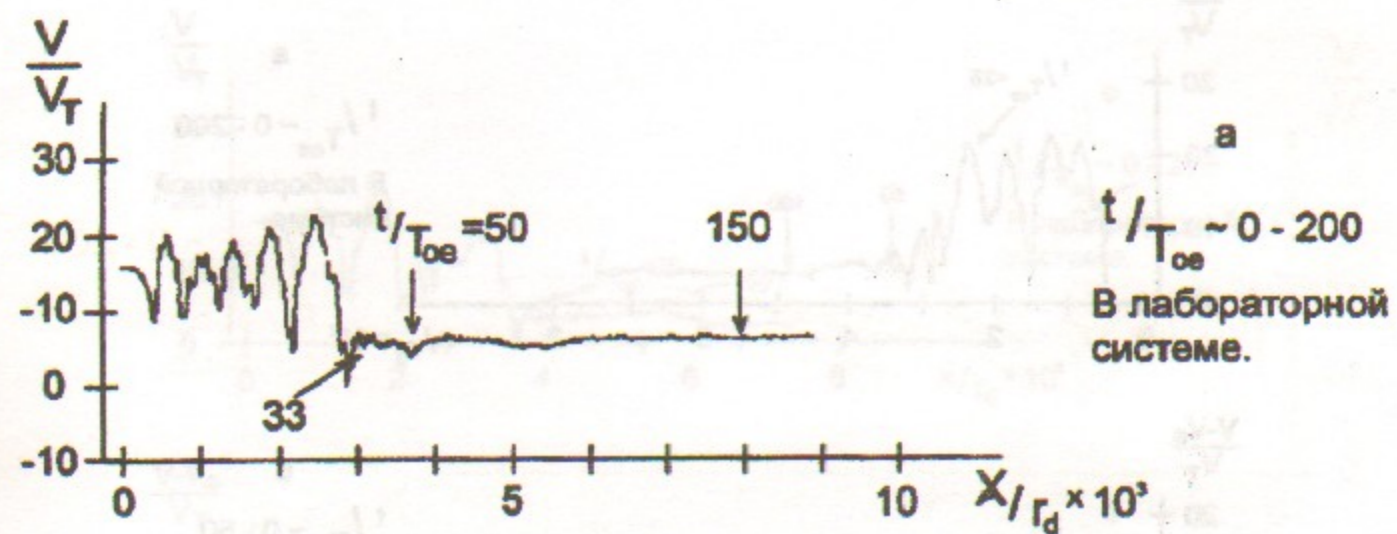
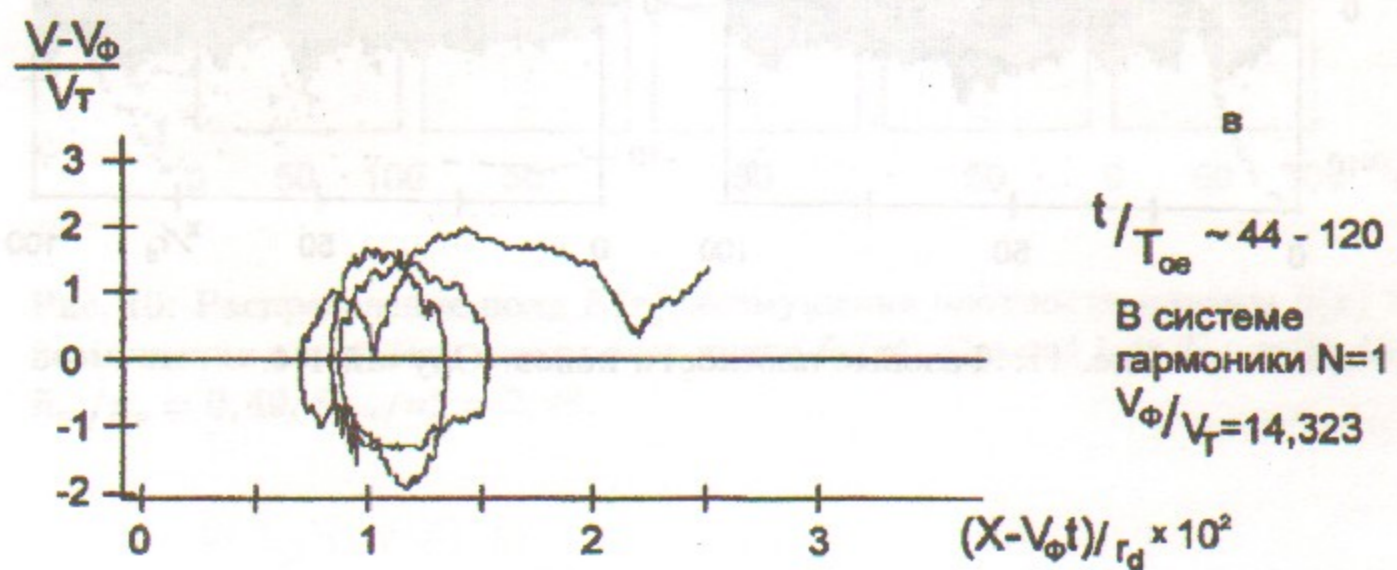
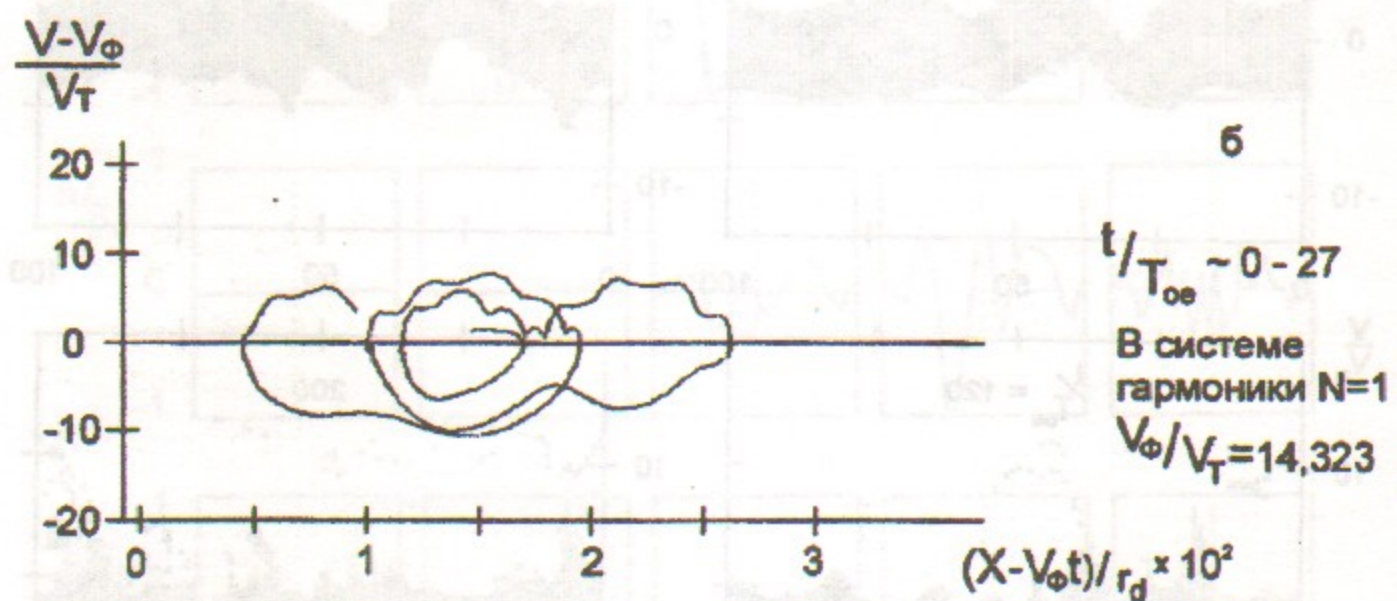
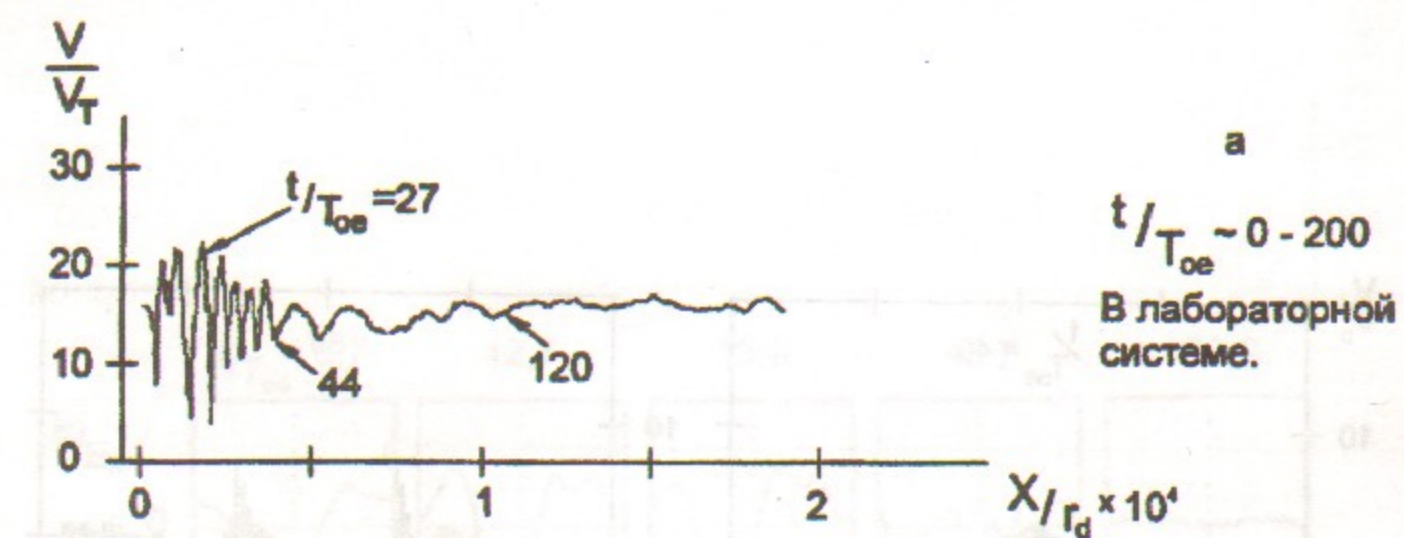


Рис. 12: Траектории частицы 1 на фазовой плоскости. Случай 1-4. $x_0/r_d = 44, V_0/V_T = 15,9$.

Рис. 13: Траектории частицы 2 на фазовой плоскости. Случай 1-4. $x_0/r_d = 38, V_0/V_T = 15,9$.

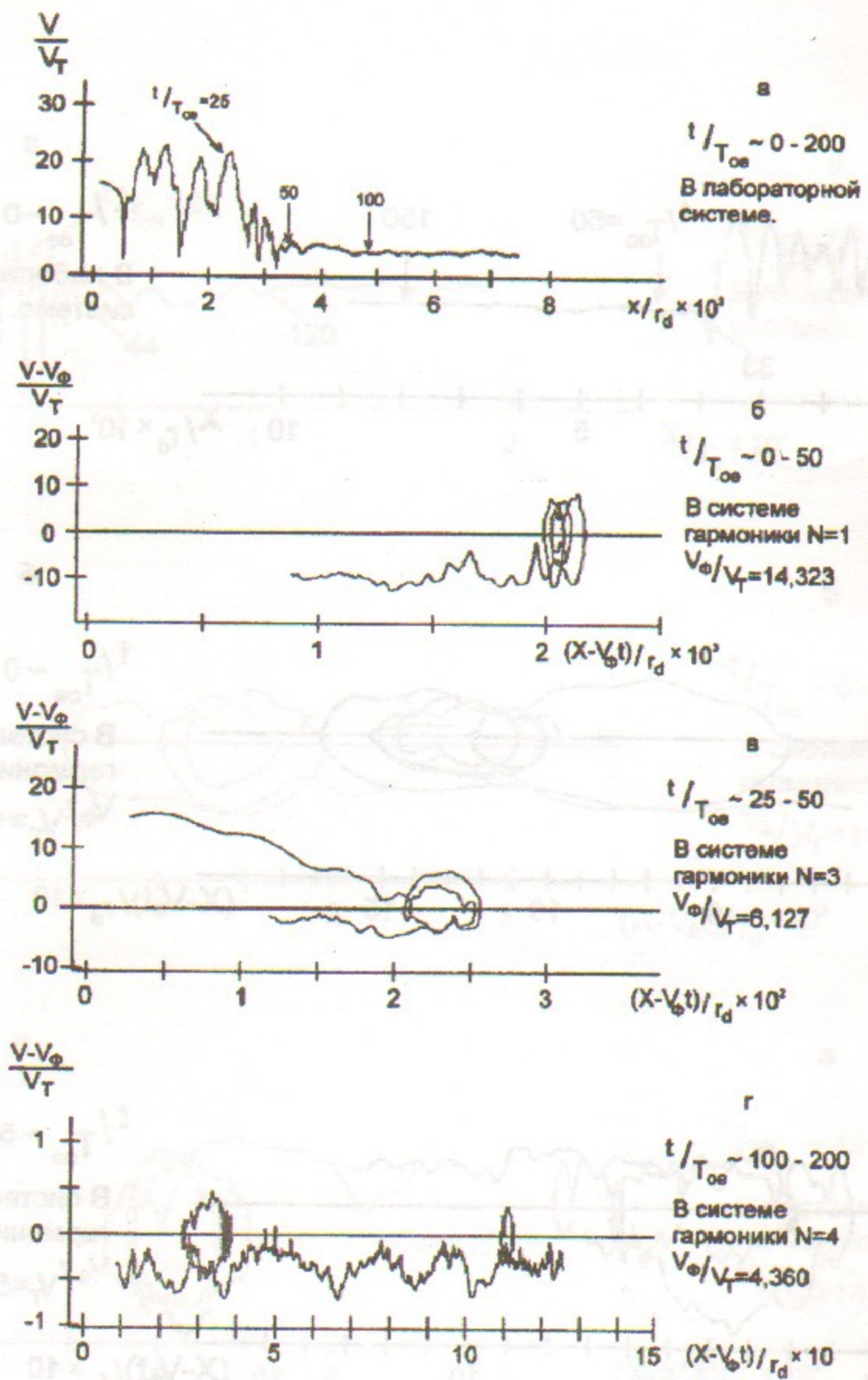


Рис. 14: Траектории частицы 3 на фазовой плоскости. Случай 1-4.
 $x_0/r_d = 55, V_0/V_T = 15,9$.

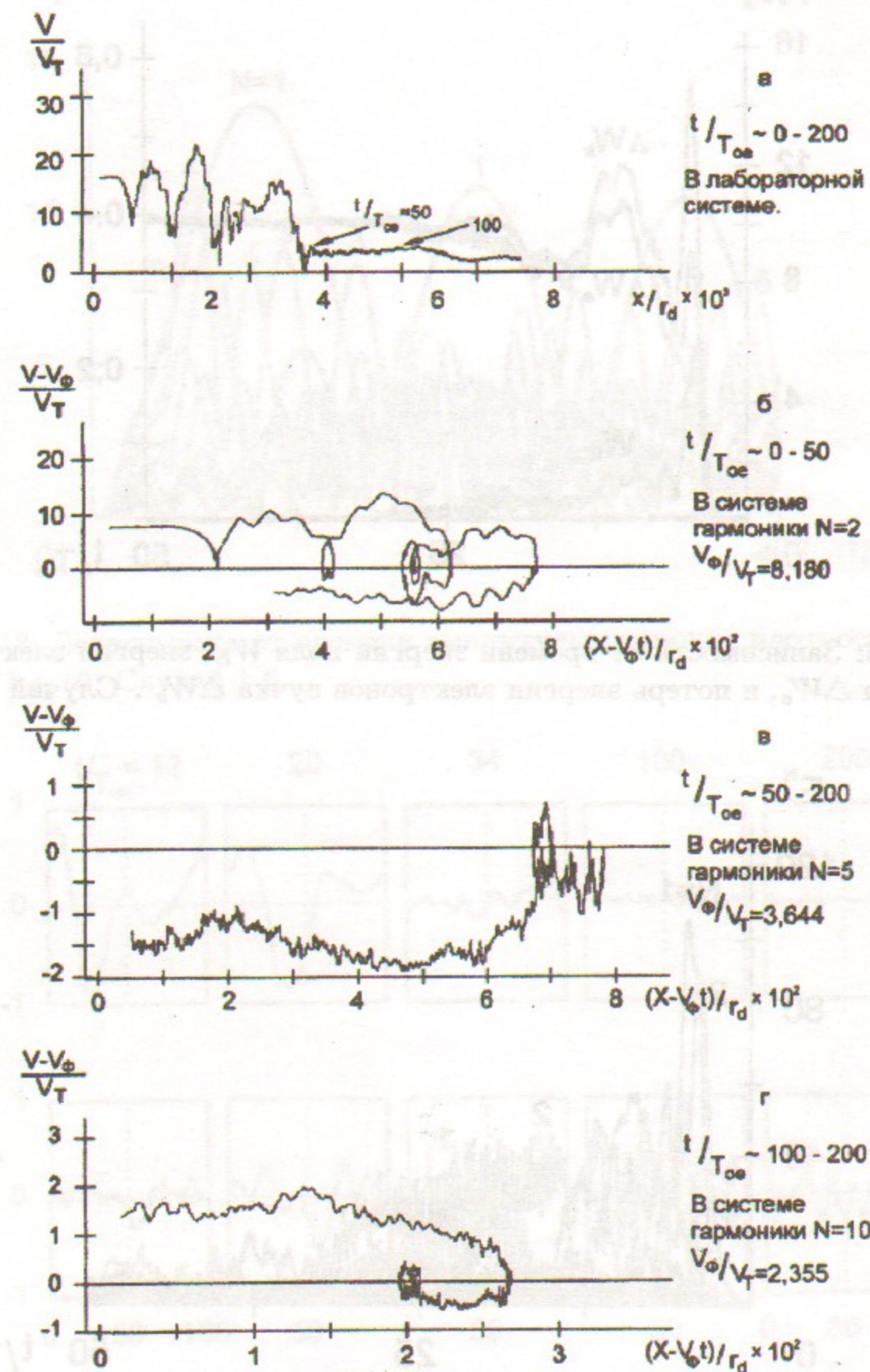


Рис. 15: Траектории частицы 4 на фазовой плоскости. Случай 1-4.
 $x_0/r_d = 20, V_0/V_T = 15,9$.

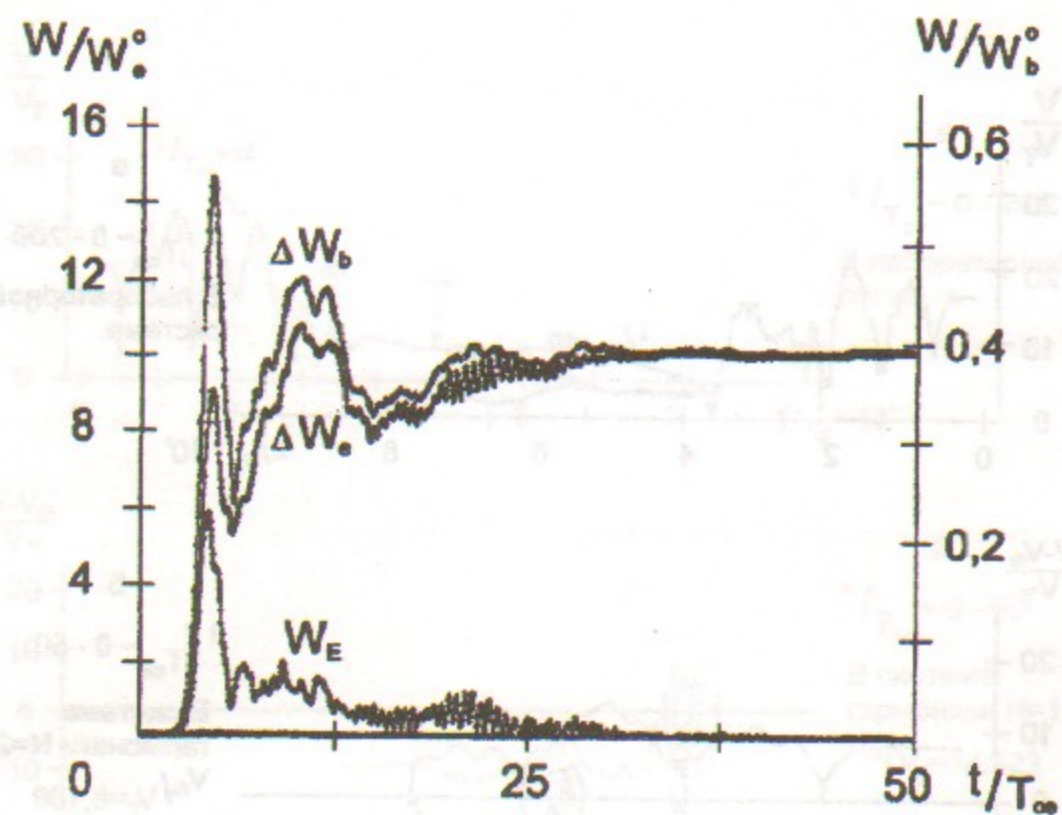


Рис. 16: Зависимость от времени энергии поля W_E , энергии электронов плазмы ΔW_e , и потерь энергии электронов пучка ΔW_b . Случай 1-6.

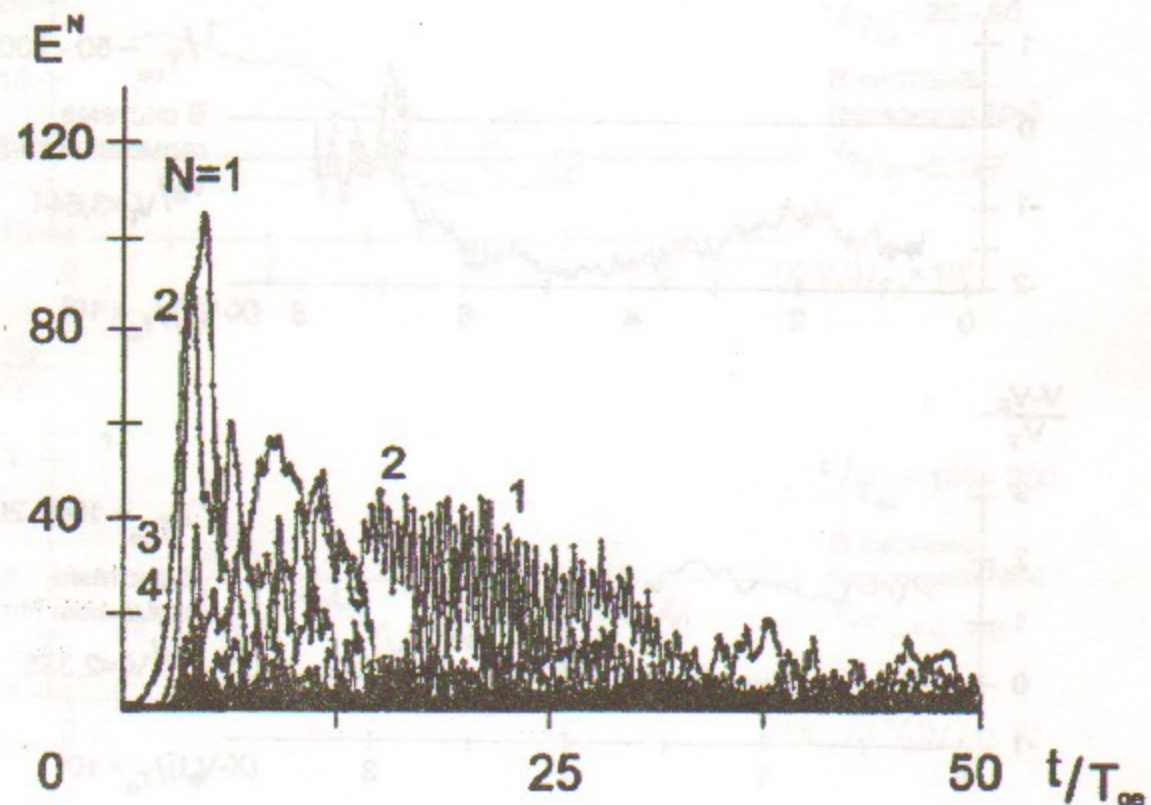


Рис. 17: Зависимость от времени амплитуды волны $N = 1$ и гармоник $N = 2 \div 10$. Случай 1-6.

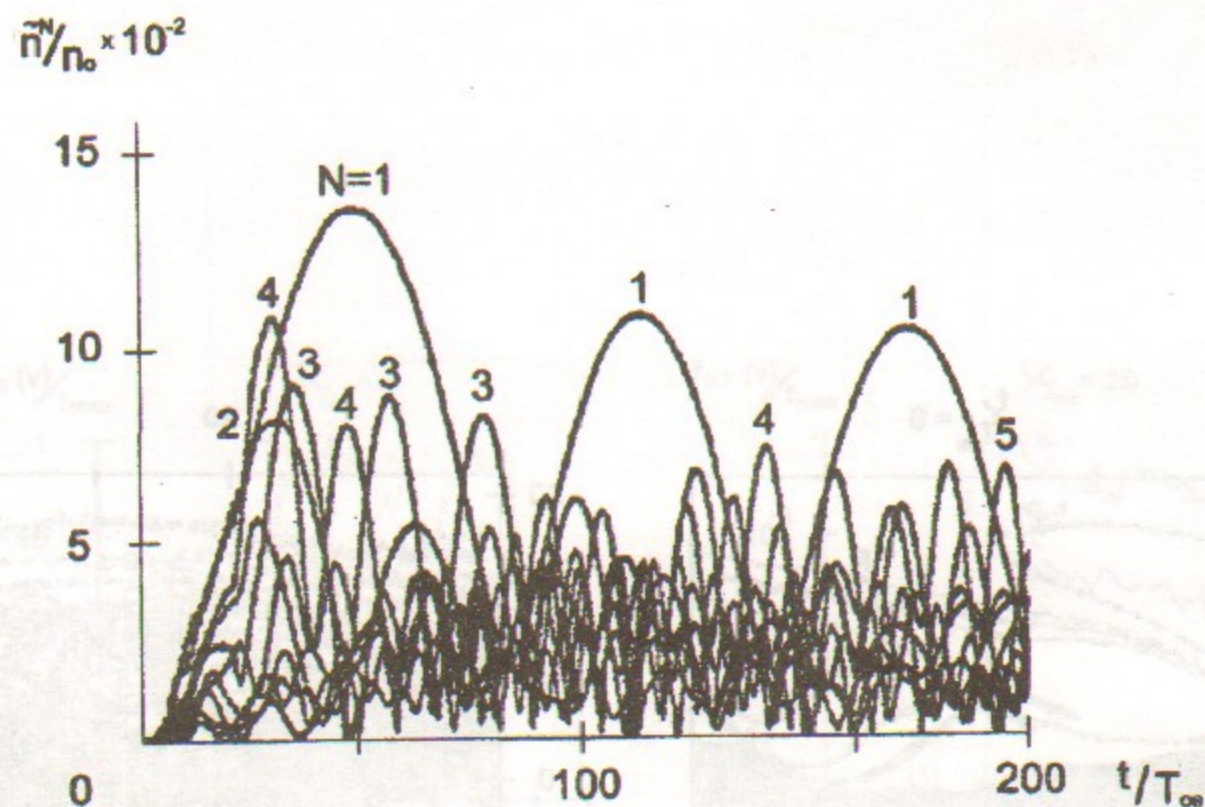


Рис. 18: Зависимость от времени амплитуды гармоник плотности ионов $N_i = 1 \div 10$. Случай 1-6.

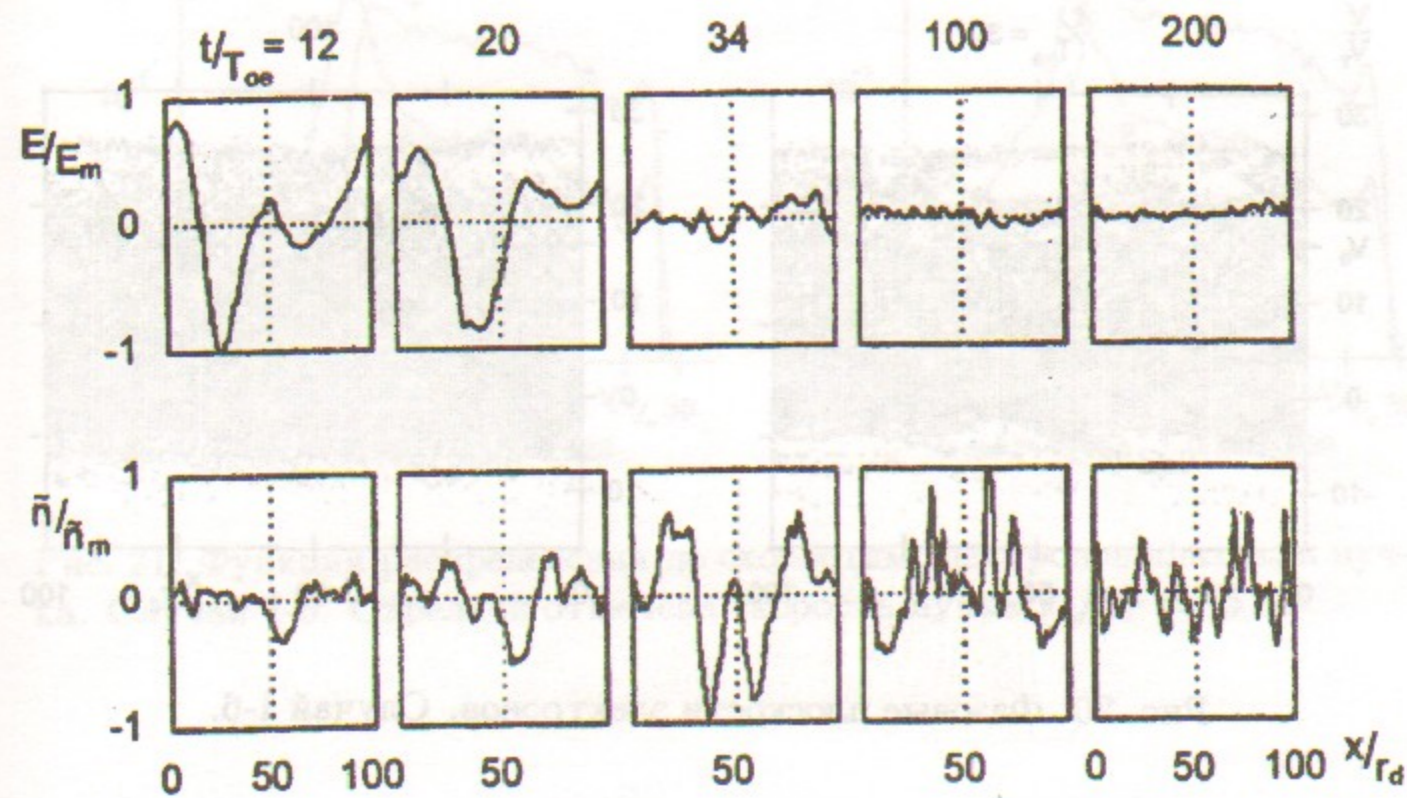


Рис. 19: Распределение поля $E(x)$ и возмущения плотности плазмы $\tilde{n}(x)$. Случай 1-6. $E_m = 93,41$, $\tilde{n}_m/n_0 = 0,32$.

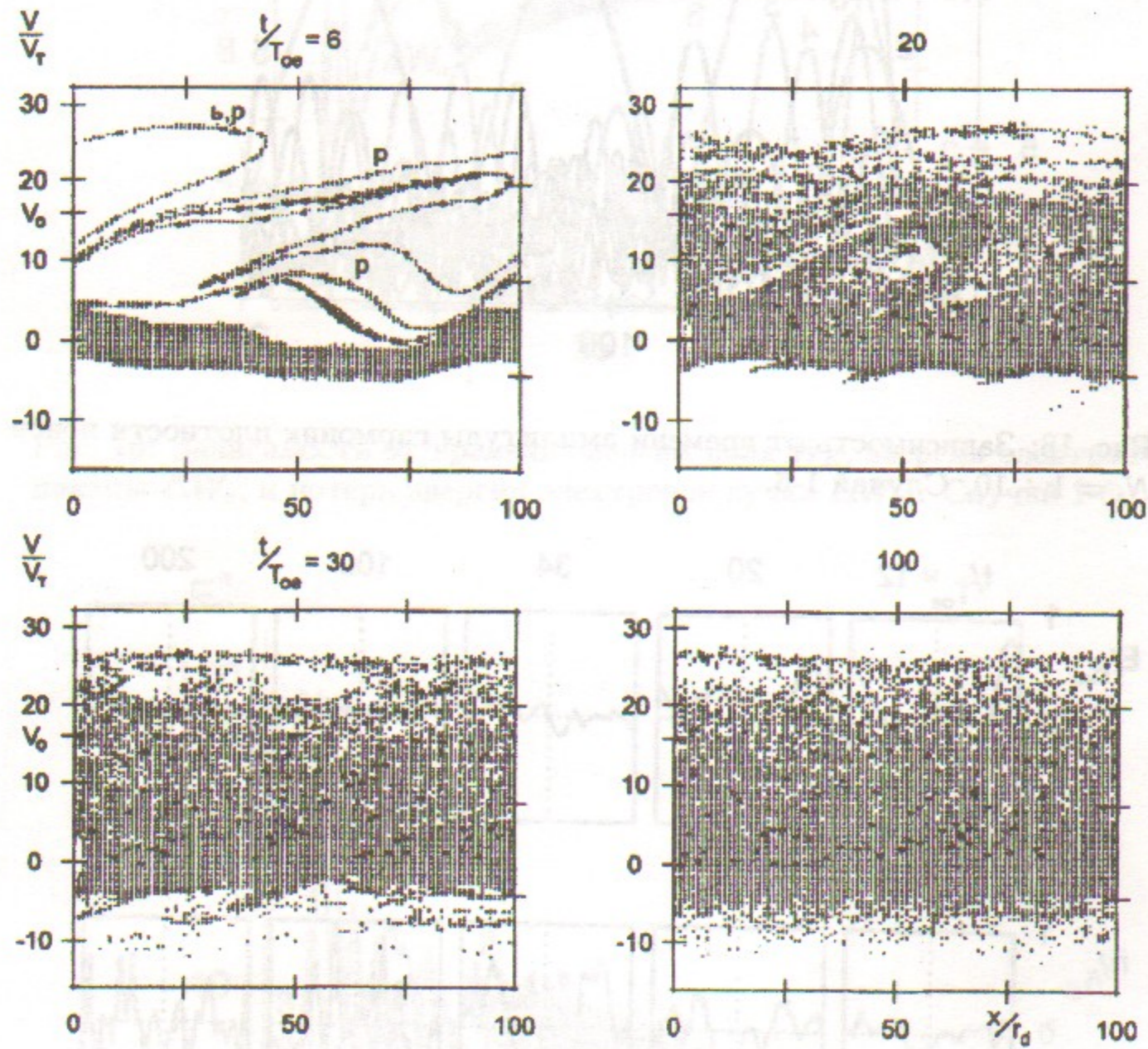


Рис. 20: Фазовые плоскости электронов. Случай 1-6.

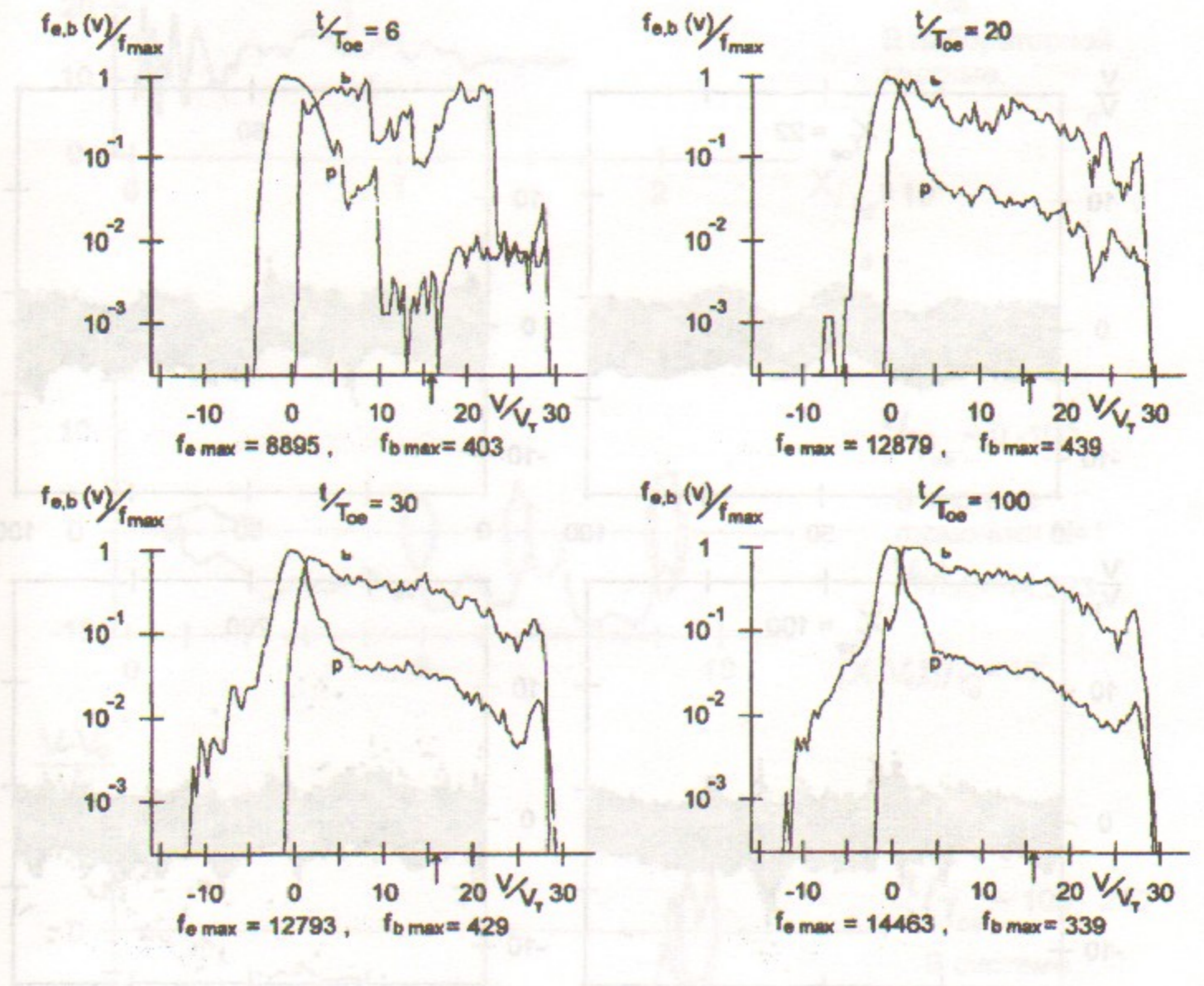


Рис. 21: Функции распределения по скоростям электронов плазмы и пучка. Случай 1-6. Стрелкой отмечена скорость пучка $V_0/V_T = 15,9$.

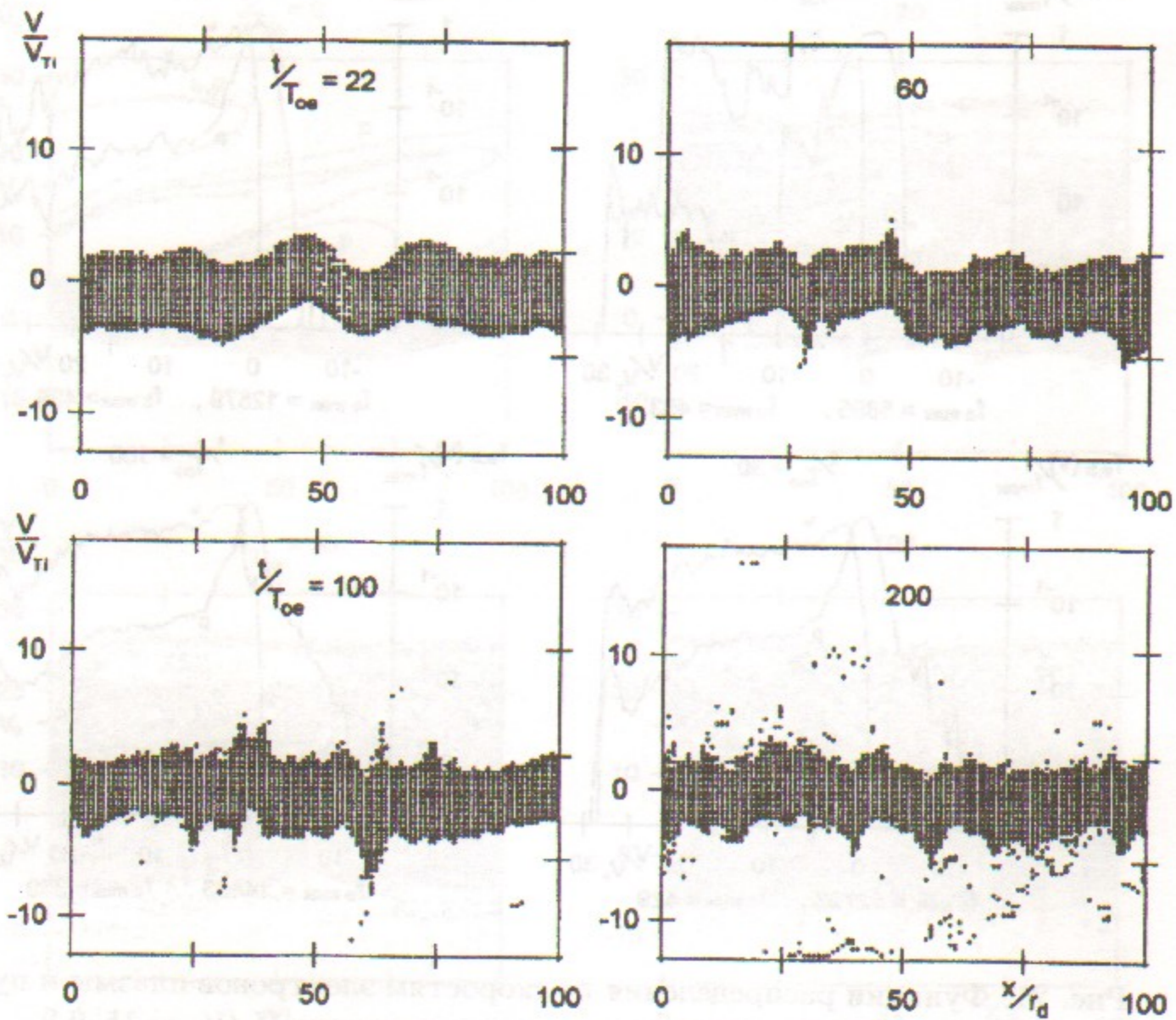


Рис. 22: Фазовые плоскости ионов. Случай 1-6.

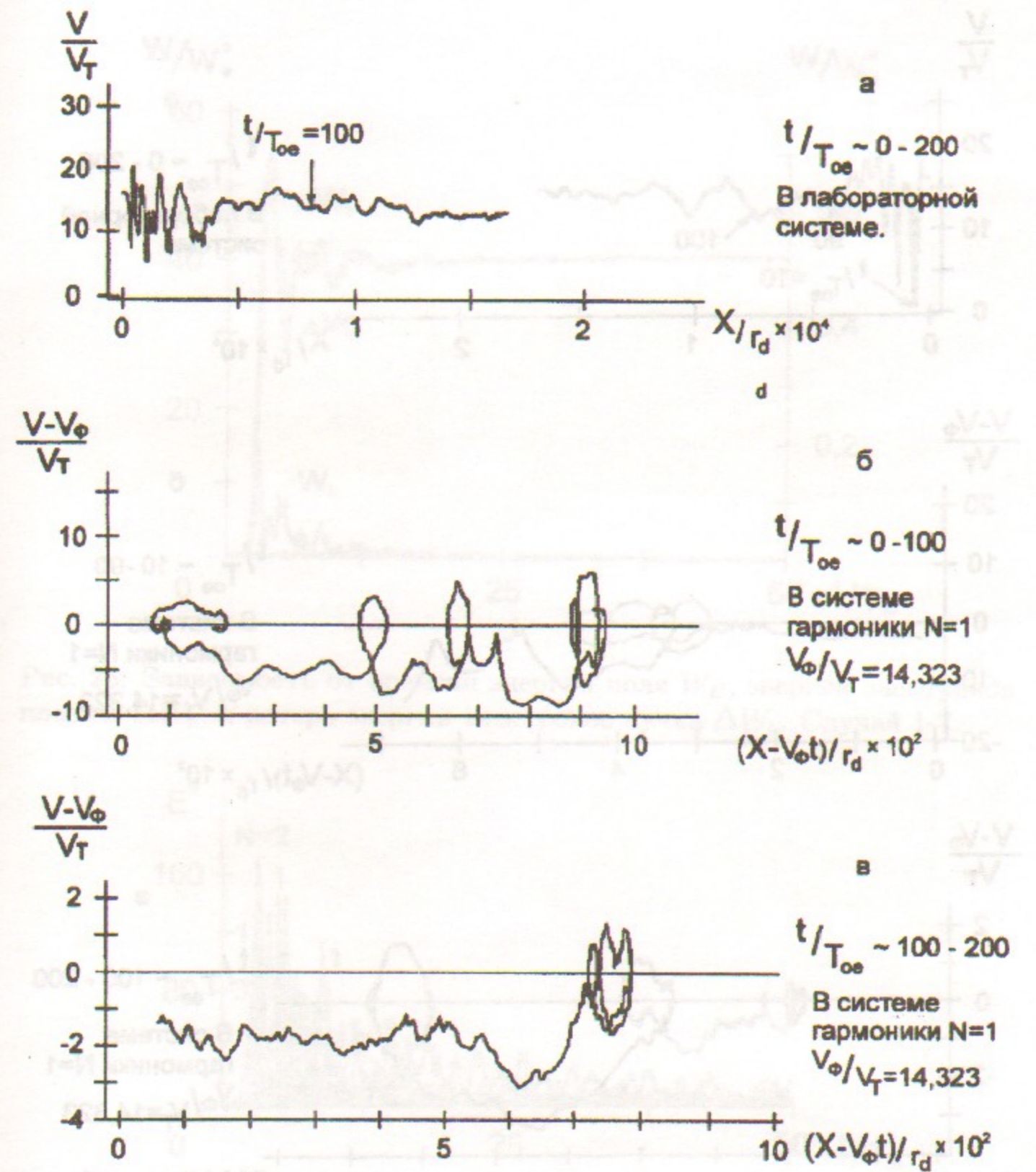


Рис. 23: Траектории частицы 1 на фазовой плоскости. Случай 1-6. $x_0/r_d = 26, V_0/V_T = 15,9$.

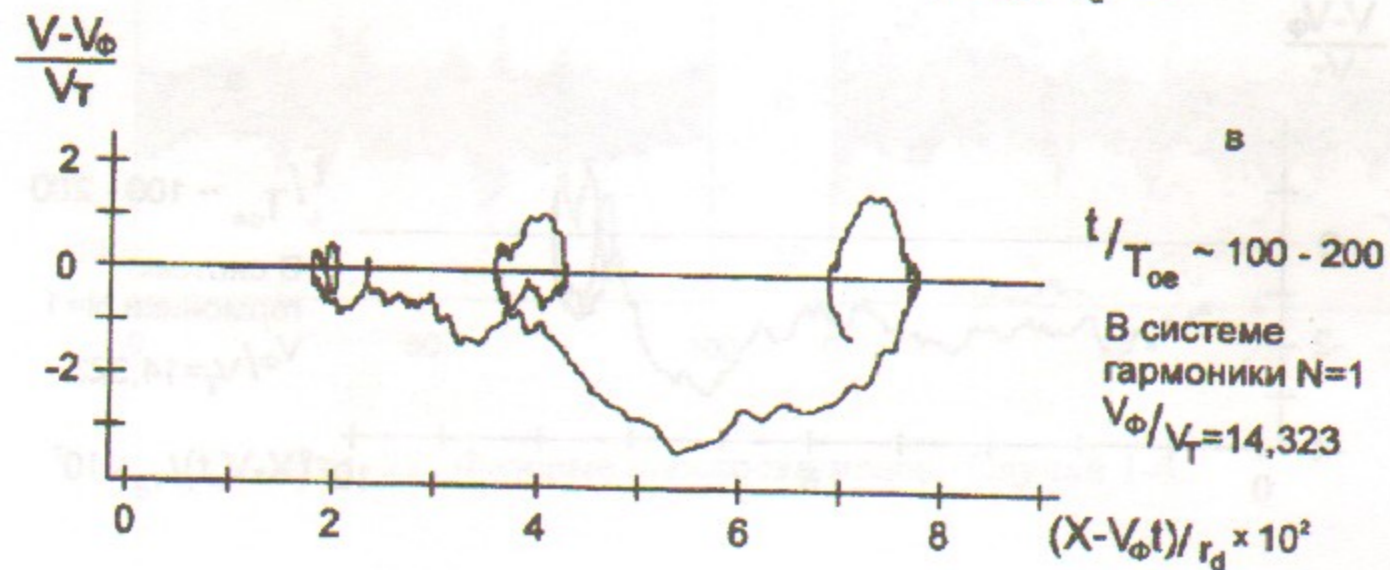
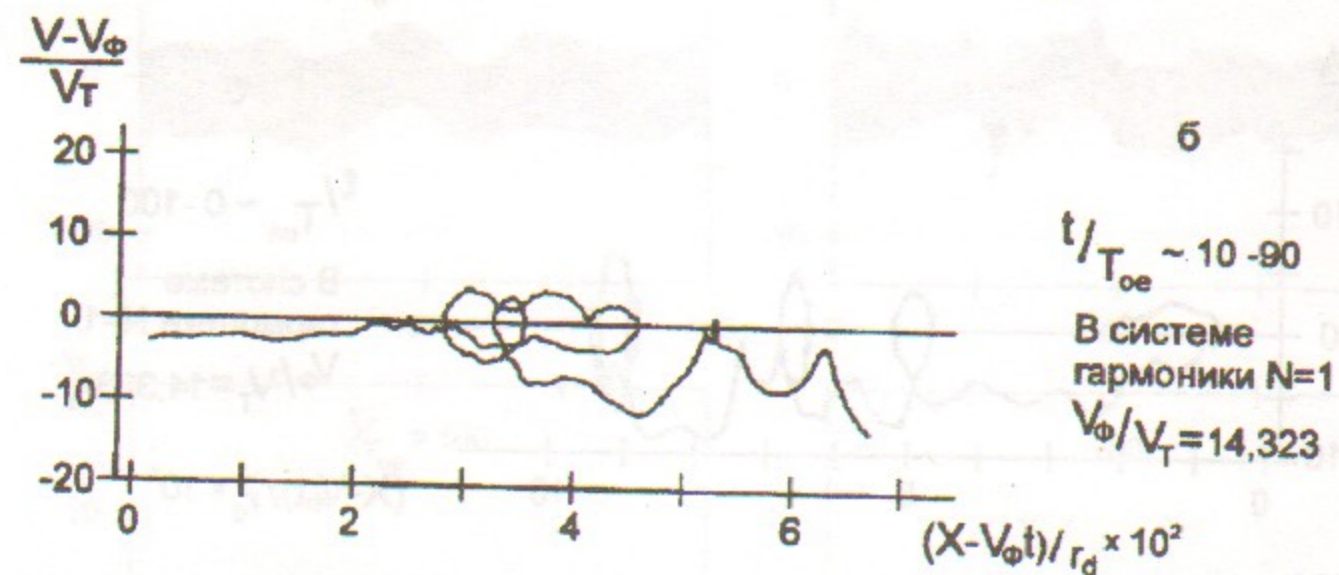
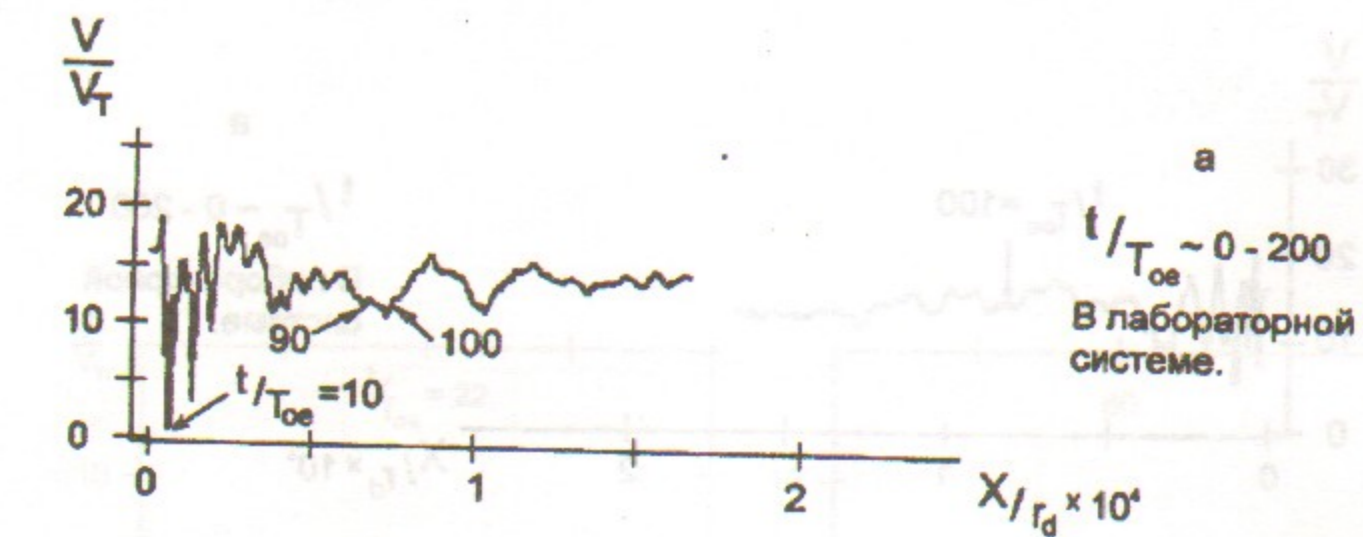


Рис. 24: Траектории частицы 2 на фазовой плоскости. Случай 1-6.
 $x_0/r_d = 73, V_0/V_T = 15,9.$

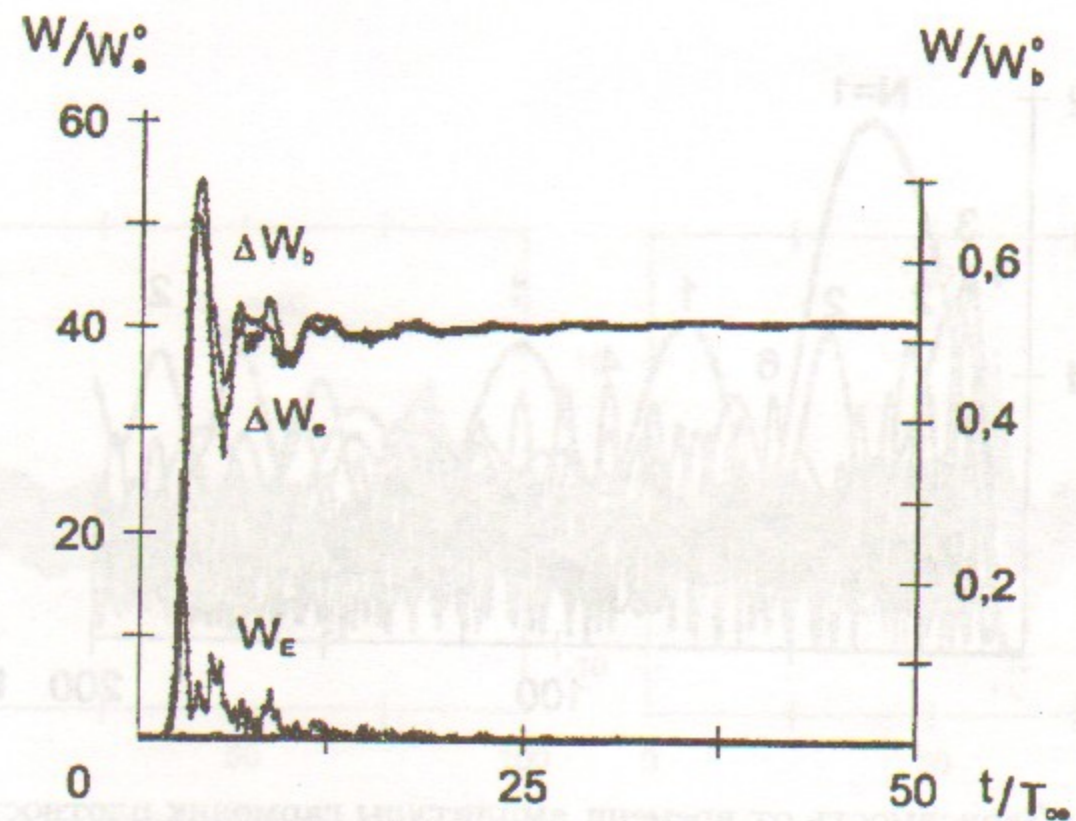


Рис. 25: Зависимость от времени энергии поля W_E , энергии электронов плазмы ΔW_e , и потерь энергии электронов пучка ΔW_b . Случай 1-7.

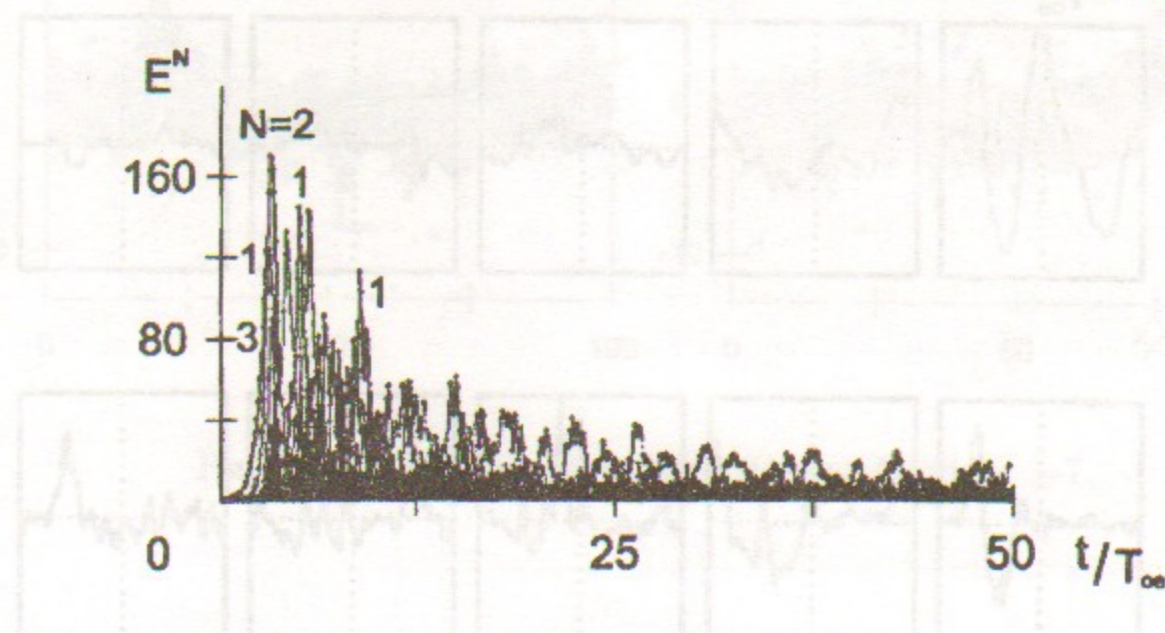


Рис. 26: Зависимость от времени амплитуды волны $N = 1$ и гармоник $N = 2 \div 30$. Случай 1-7.

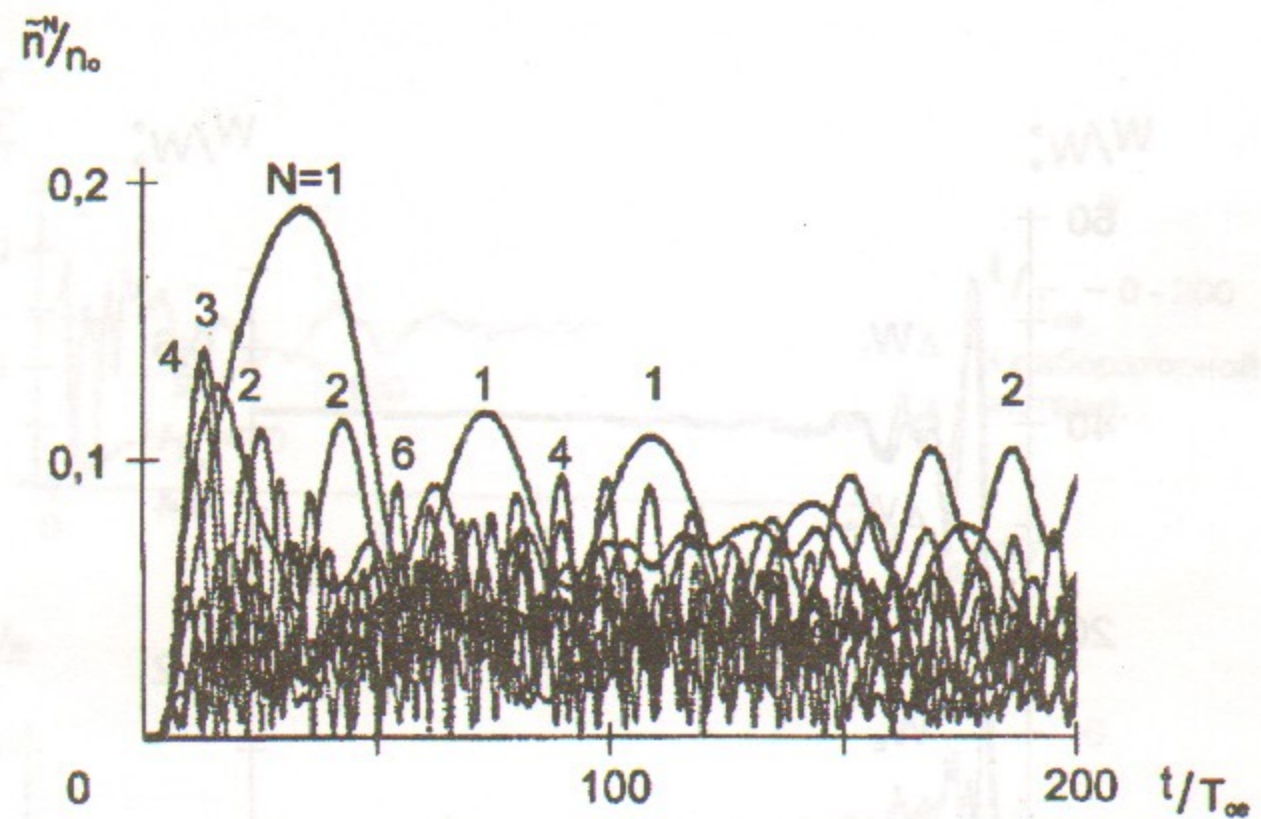


Рис. 27: Зависимость от времени амплитуды гармоник плотности ионов $N_i = 1 \div 10$. Случай 1-7.

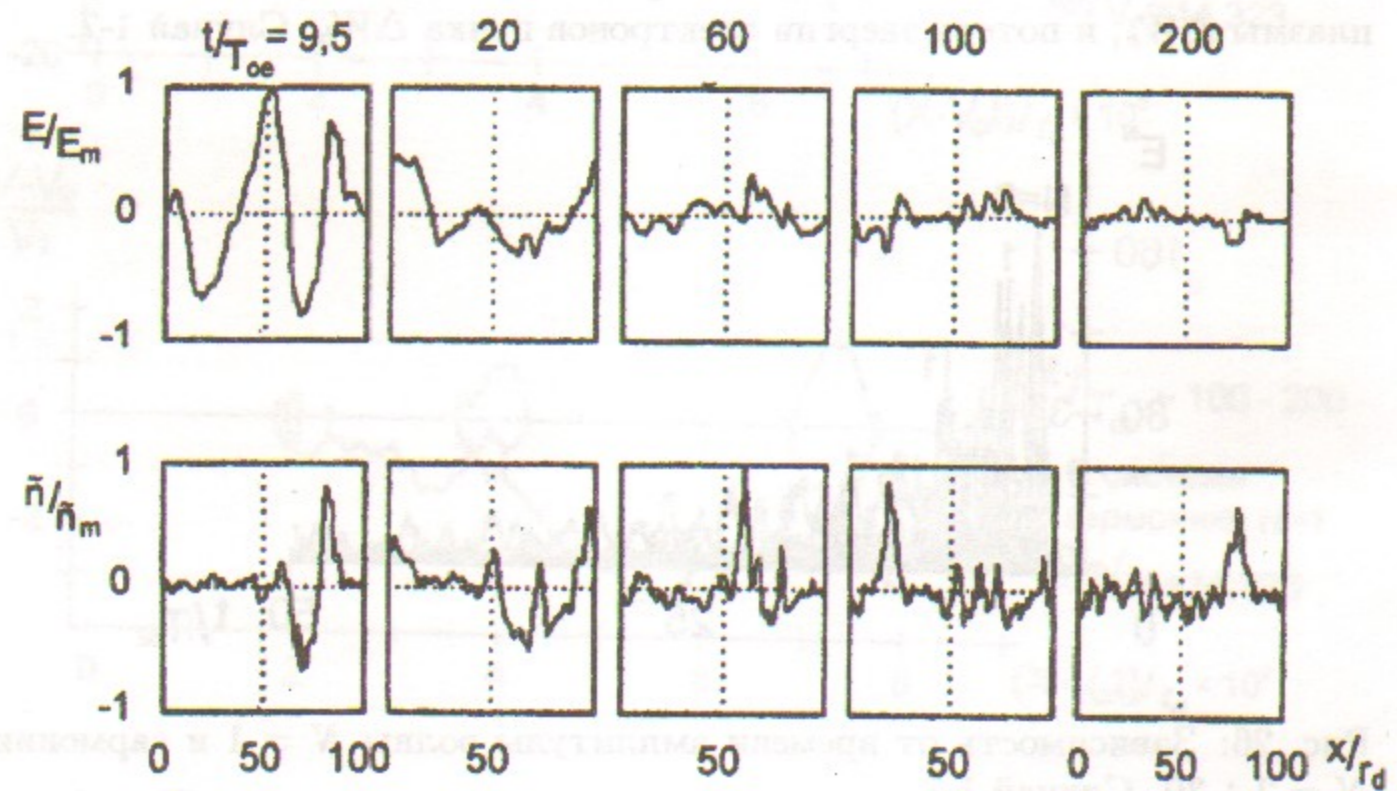


Рис. 28: Распределение поля $E(x)$ и возмущения плотности плазмы $\tilde{n}(x)$. Случай 1-7. $E_m = 72,86$, $\tilde{n}_m/n_0 = 0,65$.

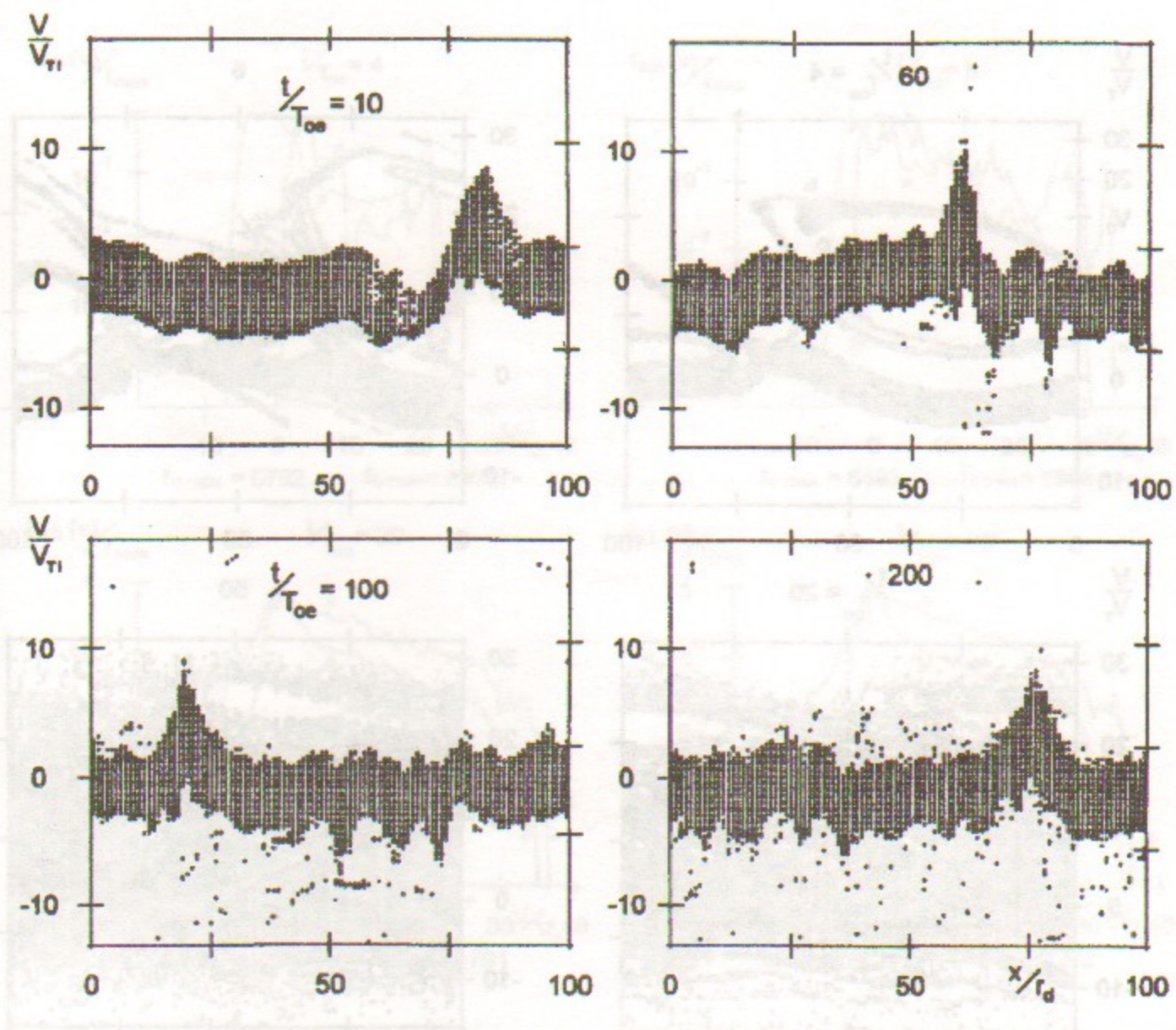


Рис. 29: Фазовые плоскости ионов. Случай 1-7.

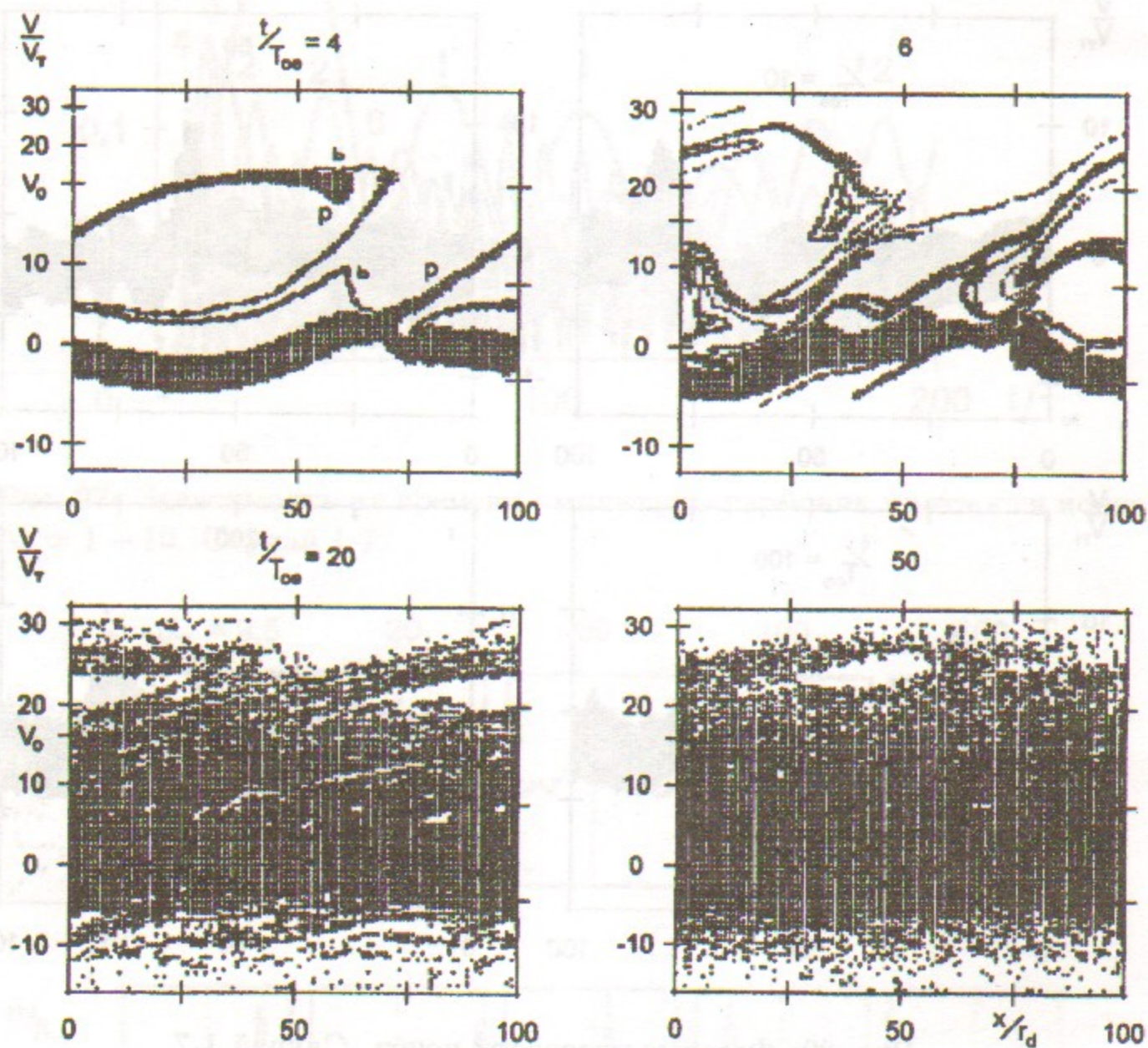


Рис. 30: Фазовые плоскости электронов. Случай 1-7.

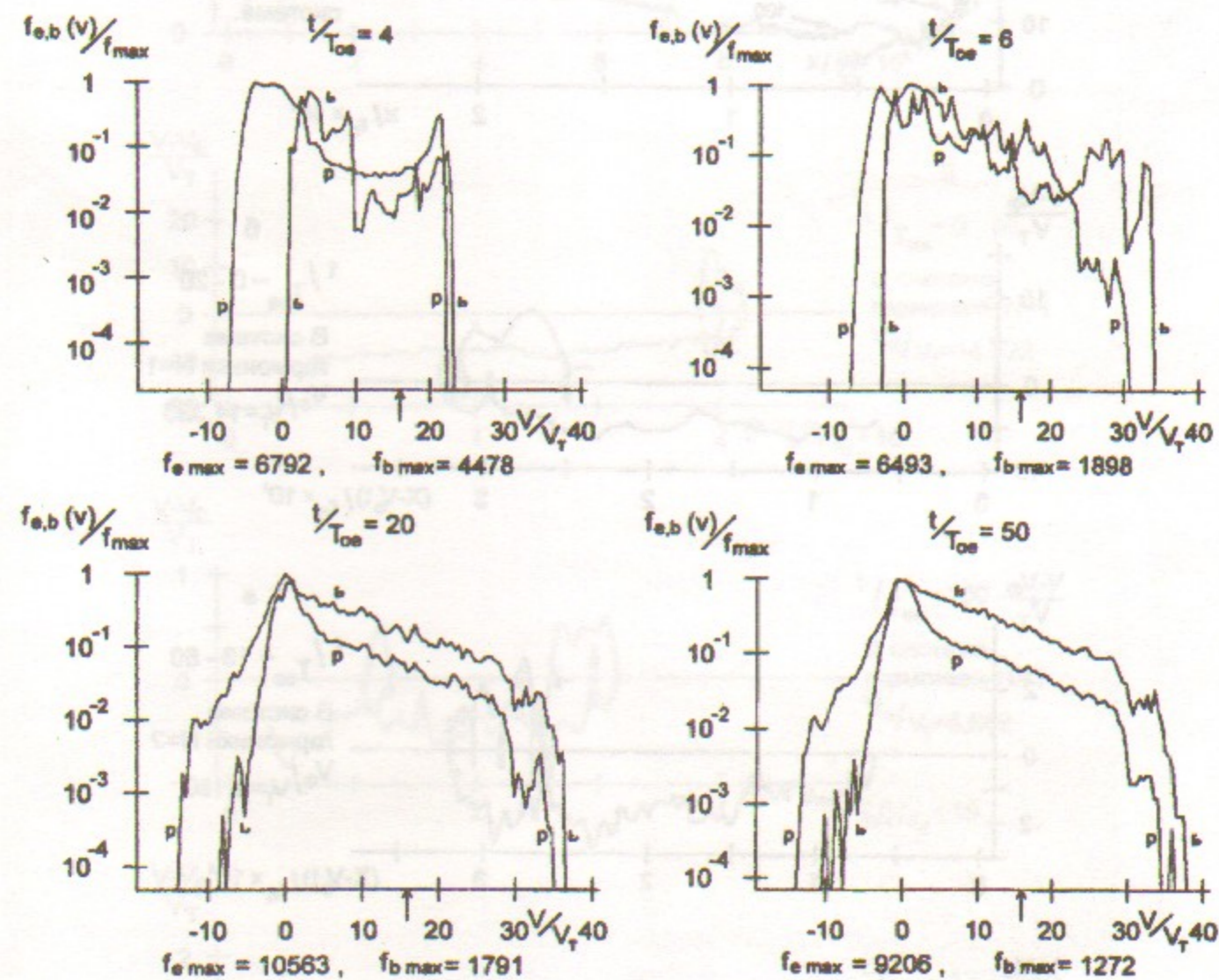


Рис. 31: Функции распределения по скоростям электронов плазмы и пучка. Случай 1-7. Стрелкой отмечена скорость пучка $V_0/V_T = 15, 9$.

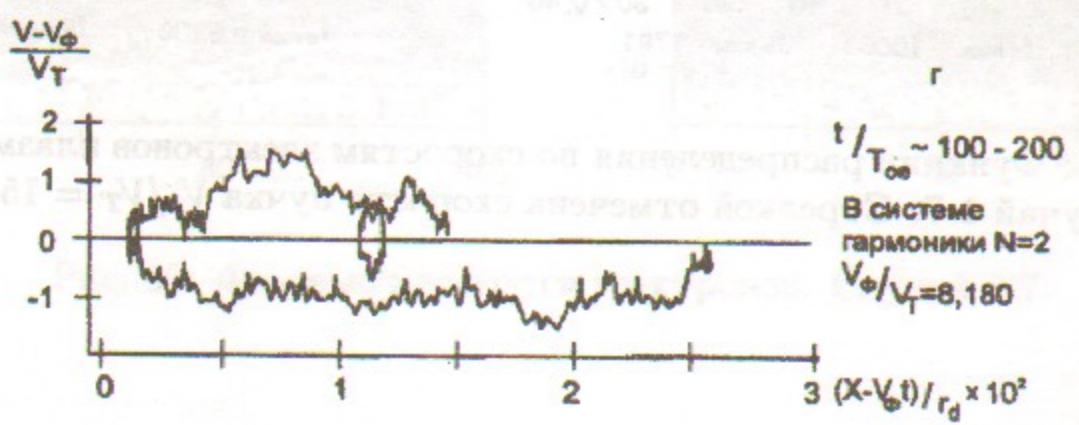
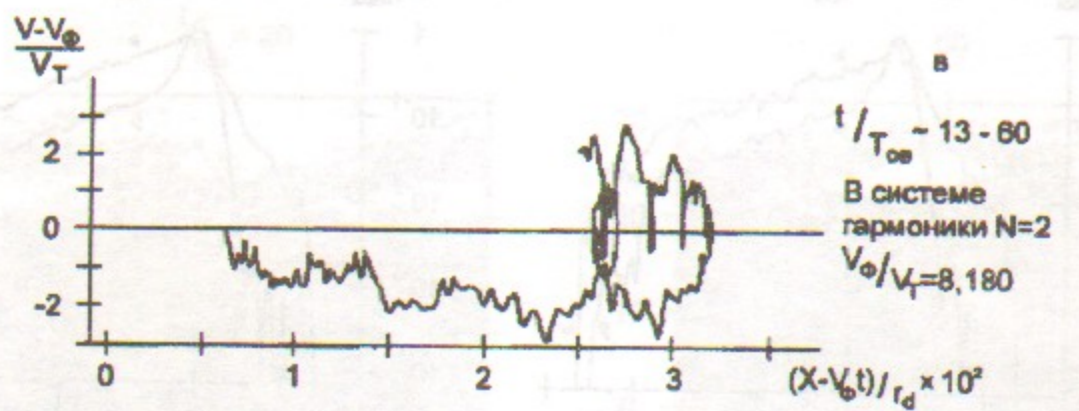
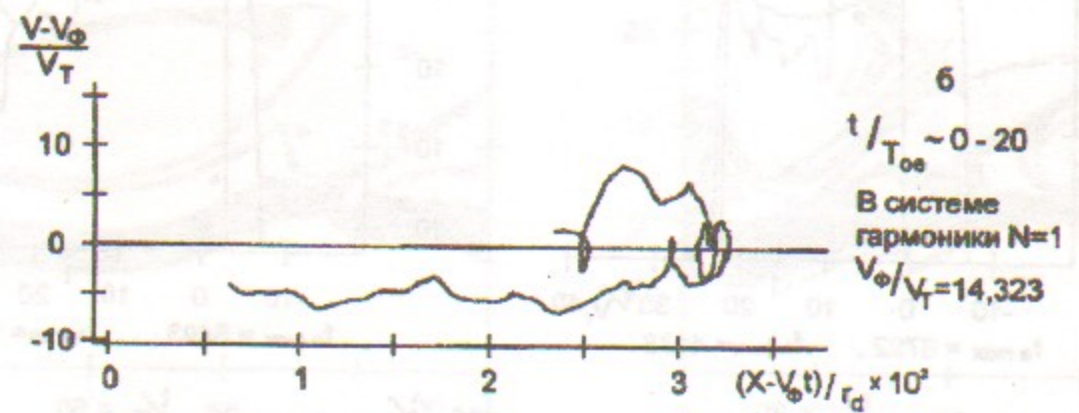
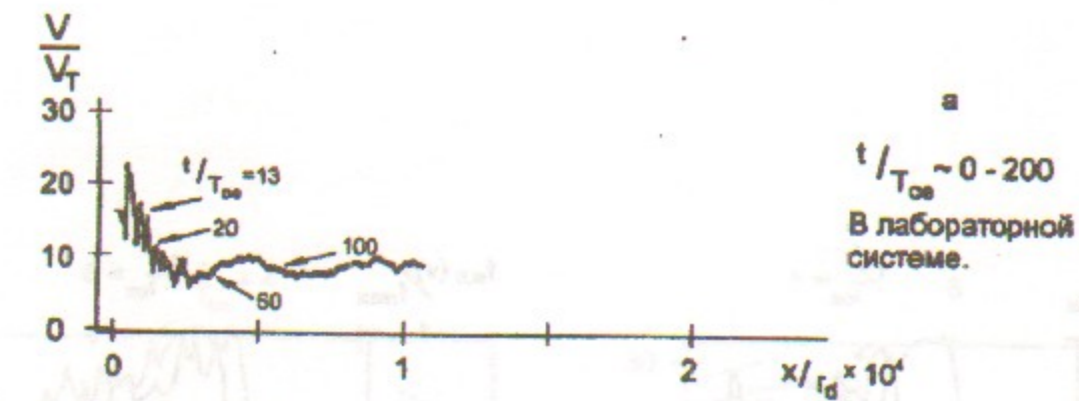


Рис. 32: Траектории частицы 1 на фазовой плоскости. Случай 1-7. $x_0/r_d = 26, V_0/V_T = 15,9$.

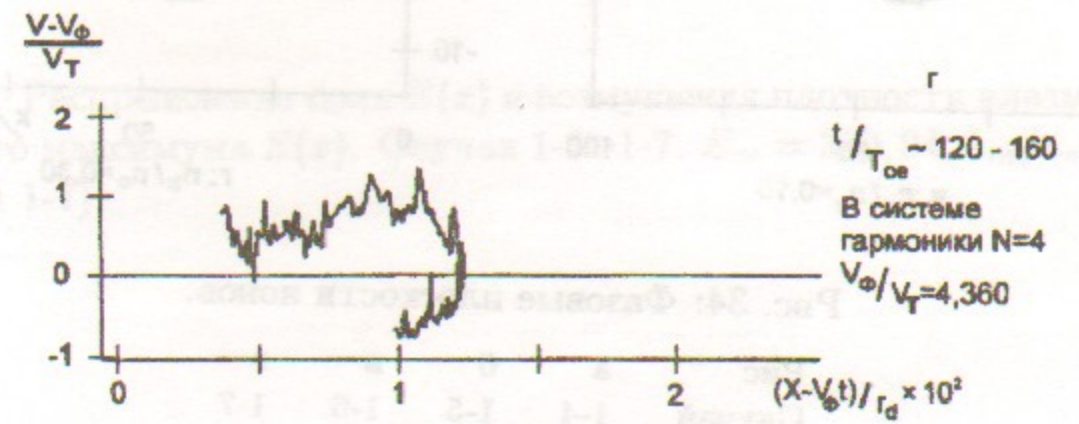
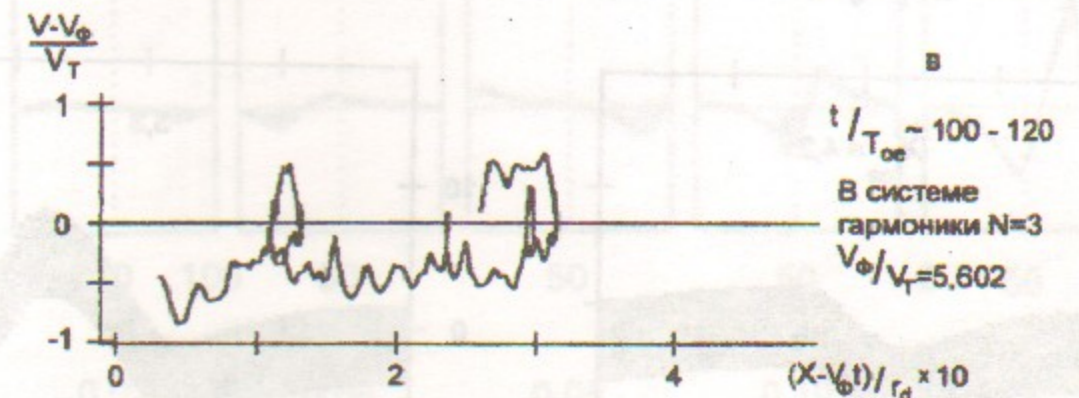
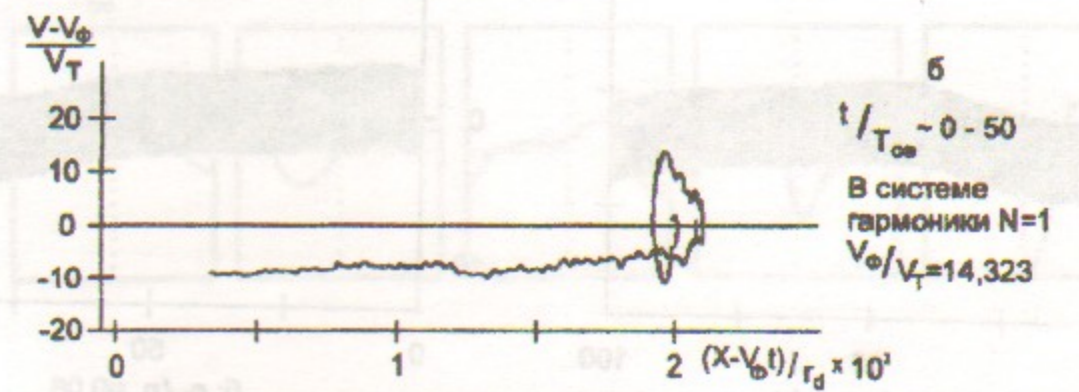
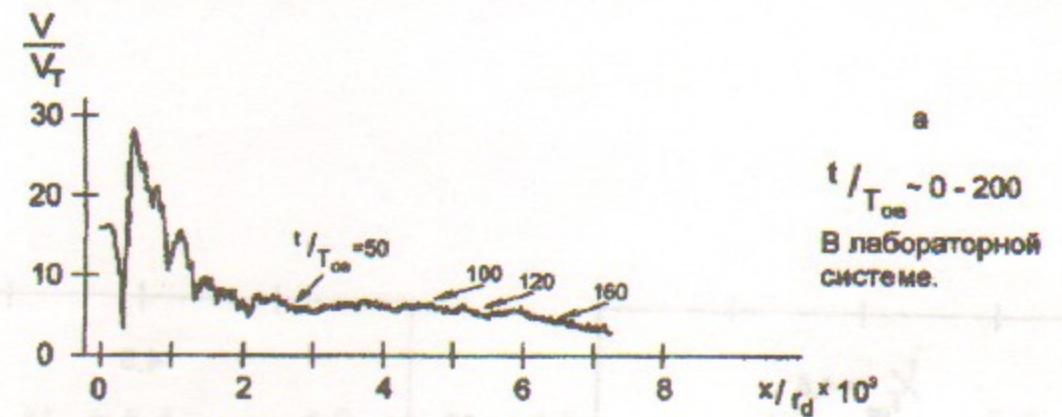


Рис. 33: Траектории частицы 2 на фазовой плоскости. Случай 1-7. $x_0/r_d = 94, V_0/V_T = 15,9$.

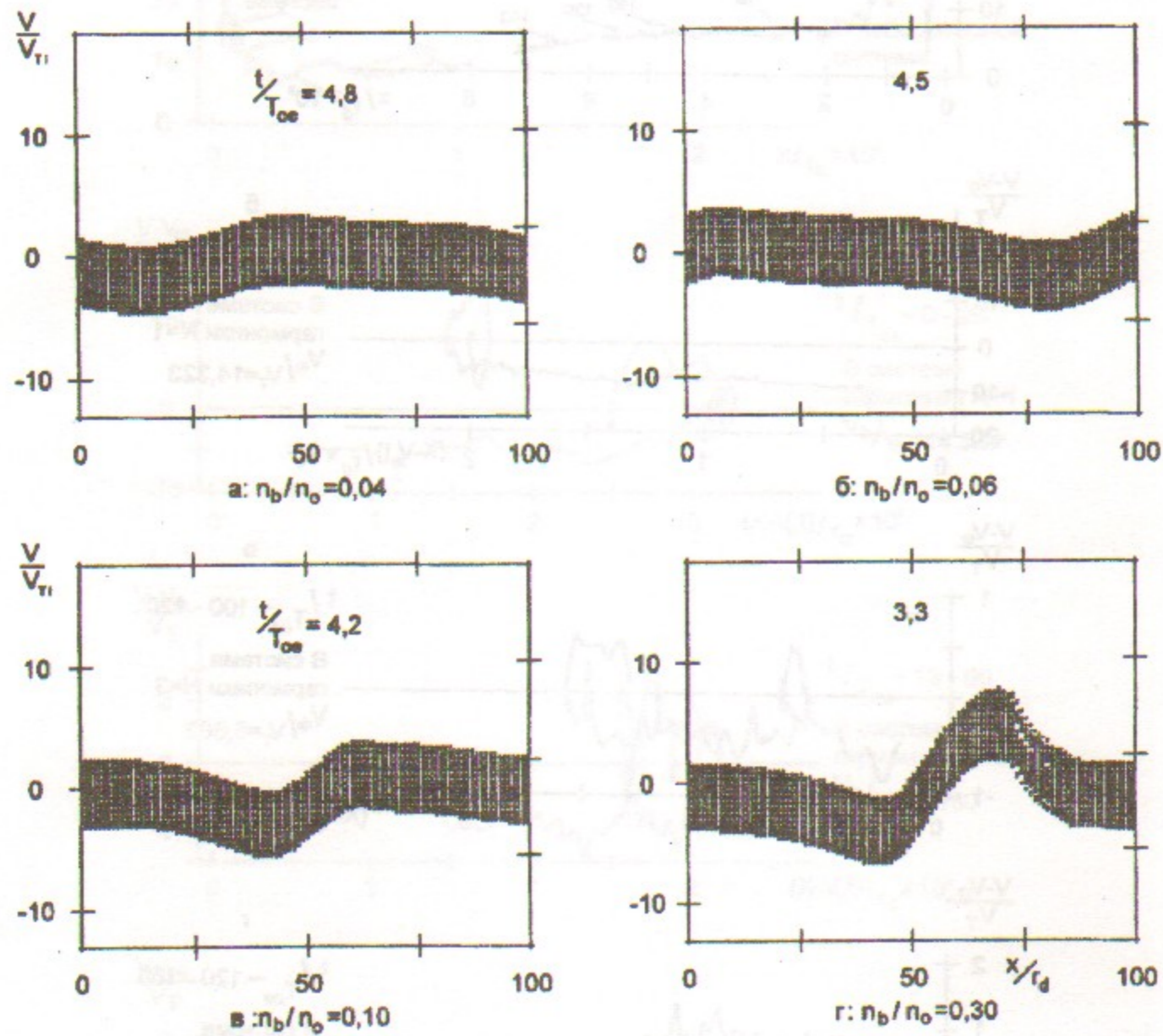


Рис. 34: Фазовые плоскости ионов.

Рис	а	б	в	г
Случай	1-4	1-5	1-6	1-7

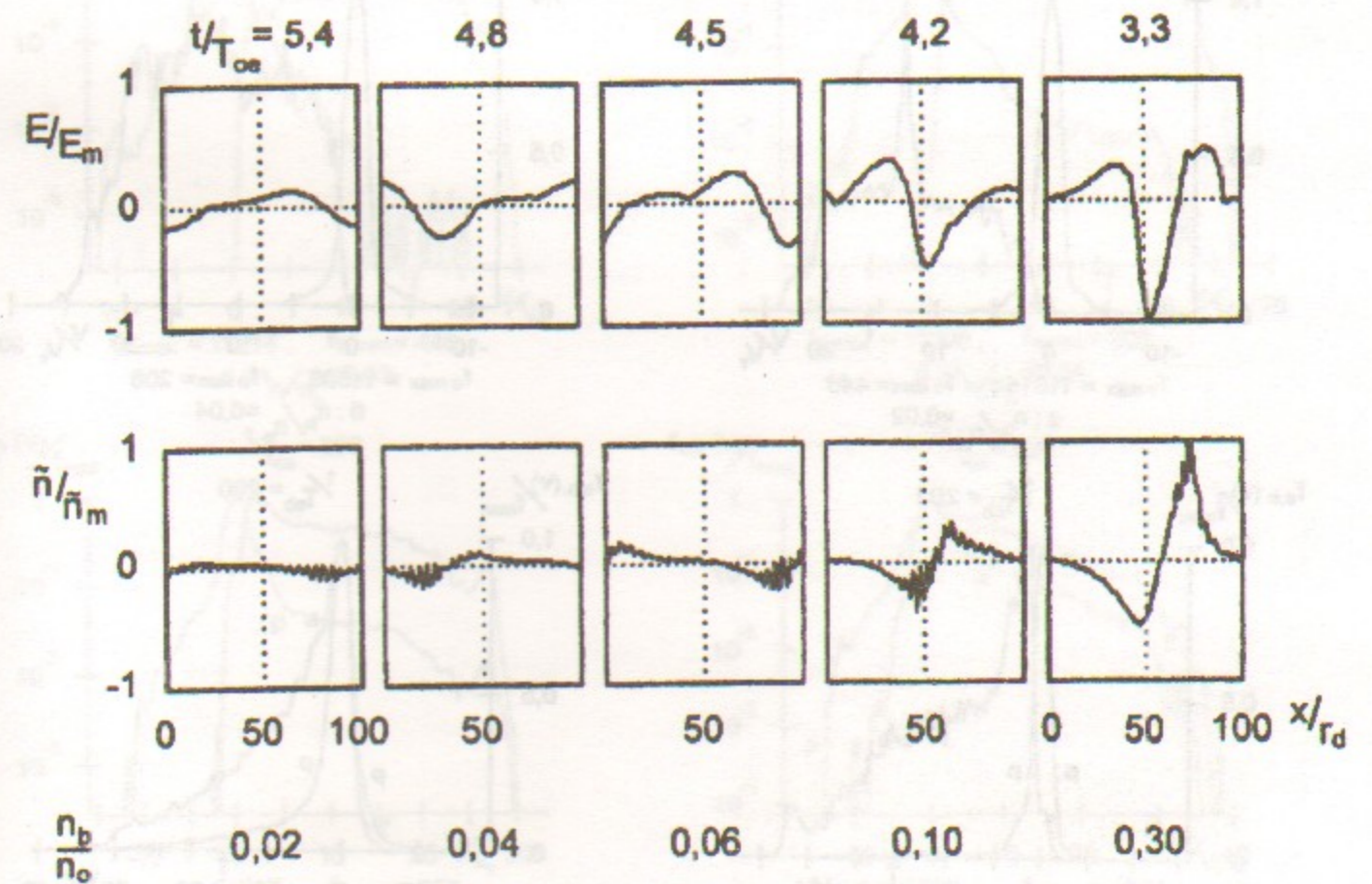


Рис. 35: Распределение поля $E(x)$ и возмущения плотности плазмы $\tilde{n}(x)$ в t первого максимума $E(x)$. Случаи 1-3÷1-7. $E_m = 390,94$, $\tilde{n}_m/n_0 = 0,018$ (случай 1-7).

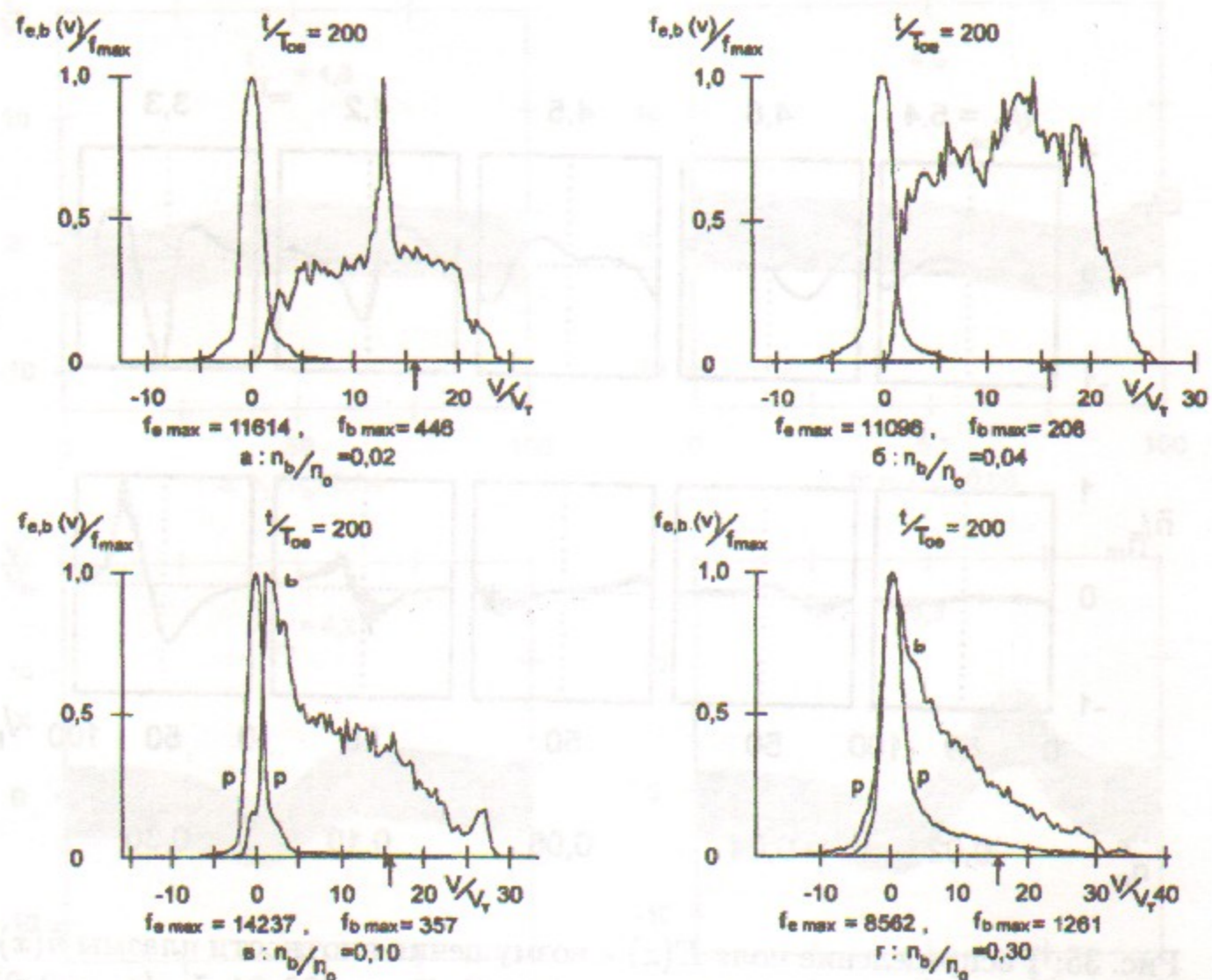


Рис. 36: Функции распределения по скоростям электронов плазмы и пучка в $t/T_{oe} \sim 200$.

Рис	а	б	в	г
Случай	1-4	1-5	1-6	1-7

Стрелкой отмечена скорость пучка $V_0/V_T = 15,9$.

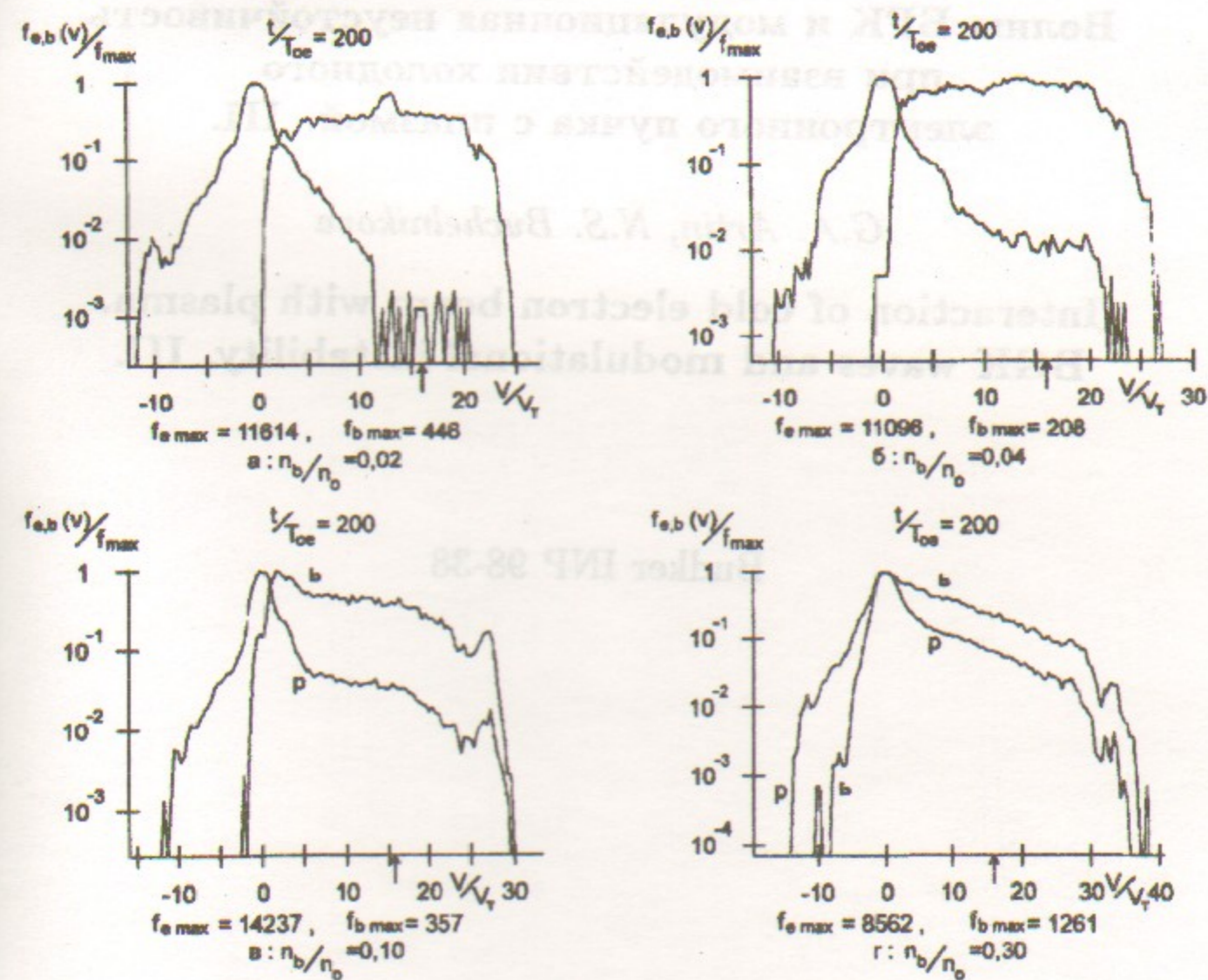


Рис. 37: Функции распределения по скоростям электронов плазмы и пучка в $t/T_{oe} \sim 200$.

Рис	а	б	в	г
Случай	1-4	1-5	1-6	1-7

Стрелкой отмечена скорость пучка $V_0/V_T = 15,9$.

Г.А. Артин, Н.С. Бучельникова

**Волны БГК и модуляционная неустойчивость
при взаимодействии холодного
электронного пучка с плазмой. III.**

G.A. Artin, N.S. Buchelnikova

**Interaction of cold electron beam with plasma.
BGK waves and modulational instability. III.**

Budker INP 98-38

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев

Работа поступила 3.06. 1998 г.

Сдано в набор 4.06.1998 г.

Подписано в печать 4.06.1998 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 2.8 печ.л., 2.3 уч.-изд.л.

Тираж 140 экз. Бесплатно. Заказ № 38

Обработано на IBM PC и отпечатано на
ротапринте ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.