



Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт ядерной физики
им. Г.И. Будкера

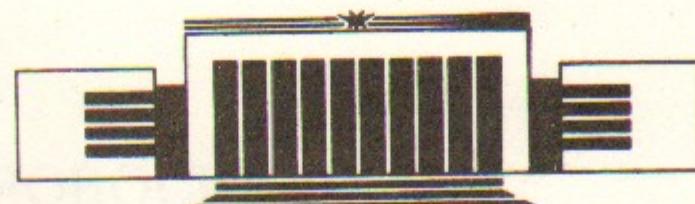
4, 86

Г.А. Артин, Н.С. Бучельникова, Б.Н. Лазеев

ВОЛНА
БЕРНШТЕЙНА-ГРИНА-КРУСКАЛА
В ДЛИНОЙ СИСТЕМЕ. II.
НЕУСТОЙЧИВОСТЬ САТЕЛЛИТОВ



ИЯФ 95-24



НОВОСИБИРСК

Волна Бернштейна–Грина–Крускала
в длинной системе. II.
Неустойчивость сателлитов

Г.А.Артин, Н.С.Бучельникова, Б.И.Лазеев

ГНЦ РФ “Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН”
630090, Новосибирск, Россия

Аннотация

Проведены численные эксперименты (метод частиц в ячейках) по исследованию долговременного развития (до $t/T_{oe} \sim 300 - 500$, $\omega_{oe}t \sim 2000 - 3000$) сателлитной неустойчивости волны БГК с областью захвата, заполненной электронами, в длинной системе $L/r_d = 3\lambda^B/r_d = 300$. Рассмотрено два случая: 1 — волна БГК ($V_\phi^B/V_T = 15.1$, $V_3^B/V_T = 5.0$, $V_3 = 2\sqrt{\frac{e\varphi}{m}}$) без пролетных электронов, так что функция распределения по скоростям $f_b(V)$ имеет вид размытого пучка; и 2 — волна БГК ($V_\phi^B/V_T = 15.9$; $V_3^B/V_T = 5.3$) с пролетными электронами, так что $f_b(V)$ имеет вид плато с резкими краями.

Показано, что начальная стадия неустойчивости сателлитов имеет характер пучковой неустойчивости. В случае 1 развитие неустойчивости начинается с возбуждения длинноволновых гармоник с фазовыми скоростями V_ϕ^N , близкими к фазовой скорости волны БГК — $V_\phi^N < V_\phi^B$. В случае 2 гармоники с фазовыми скоростями в области плато не возбуждаются и развитие начинается с возбуждения коротковолновых гармоник с V_ϕ^N в районе края $f_b(V)$.

Развитие неустойчивости сателлитов приводит к развитию сильной стохастической неустойчивости движения электронов в районе областей захвата волны БГК и гармоник-сателлитов. В результате этой неустойчивости функция распределения $f_b(V)$ расплывается и начинают возбуждаться новые гармоники-сателлиты. При этом развитие неустойчивости в случаях 1 и 2 приобретает одинаковый характер. С течением времени функция распределения приобретает вид плато, амплитуды исходной волны БГК и гармоник-сателлитов становятся в среднем постоянными, а на фазовой плоскости образуется квазистационарная структура, включающая всю область стохастического движения.

The Bernstein-Green-Kruskal Wave in a Long System. II. The Sideband Instability

G.A.Artin, N.S.Buchelnikova, B.N.Lazeev

The State Scientific Center of Russia
The Budker Institute of Nuclear Physics, SB RAS

Abstract

The long-time evolution (up to $t/T_{oe} \sim 300 - 500$, $\omega_{oet} \sim 2000 - 3000$) of the sideband instability of the bunch-type BGK wave in a long system $L/r_d = 3\lambda^B/r_d = 300$ was studied in numerical experiments (PIC-method). Two cases were studied: 1. BGK wave ($V_{ph}^B/V_T = 15.1$; $V_{tr}^B = 5.0$; $V_{tr} = 2\sqrt{\frac{e\varphi}{m}}$) without the untrapped electrons; 2. BGK wave ($V_{ph}^B/V_T = 15.9$; $V_{tr}^B/V_T = 5.3$) with the untrapped electrons. In the case 1 the velocity distribution function $f_b(V)$ is like to a warm beam $f_b(V)$. In the case 2 $f_b(V)$ is a plateau with the sharp edges.

It was shown that the initial stage of the sideband instability has a character of the beam-plasma instability. In the case 1 the instability leads to the excitation of the longwavelength Langmuir waves with the phase velocities V_{ph}^N close to the phase velocity of the BGK wave $V_{ph}^N < V_{ph}^B$. In the case 2 at the initial stage of the instability the waves with V_{ph}^N in the region of the plateau are not excited and the instability begins from the excitation of the shortwavelength waves $V_{ph}^N \ll V_{ph}^B$ in the region of $f_b(V)$ edge.

The evolution of the sideband instability leads to the large scale stochasticity of the electron motion in the region of the phase plane including the trapping regions of the BGK wave and the sideband waves. The velocity distribution function is changing due to the large scale stochasticity which leads to the excitation of the new sideband waves. At this stage the evolution of the instability and the large scale stochasticity has the same character in the cases 1 and 2 — it leads to the formation of the quasistationary structure on the phase plane which includes the region of the stochastic motion of the electrons.

© The State Scientific Center of Russia
The Budker Institute of Nuclear Physics, SB RAS

В работе [1] описаны численные эксперименты (метод частиц в ячейках) по исследованию устойчивости волны БГК с областью захвата, равномерно заполненной электронами (назовем их b -электроны) в длинной системе $L > \lambda^B$. В такой волне распределение b -электронов по скоростям на длине волны $f_b(V)$ имеет вид размытого пучка. В работе [1] показано, что такая волна неустойчива относительно возбуждения ленгмюровских волн — гармоник системы (назовем их сателлиты). Неустойчивость имеет характер пучковой неустойчивости и приводит к возбуждению сателлитов с фазовыми скоростями в области положительной производной $f_b(V)$ или вблизи от нее — $V_\phi^N < V_\phi^B$. Параметры волны БГК и сателлитов, при которых неустойчивость становится существенной, можно описать параметром $\alpha = \frac{V_\phi^B + V_\phi^N}{V_\phi^B - V_\phi^N}$, $V_3 = 2\sqrt{\frac{e\varphi}{m}}$. Инкремент неустойчивости становится достаточно большим — $\gamma/\omega_{oe} > 1 \cdot 10^{-3}$ — когда $\alpha > 0.8$. В системе с пролетными частицами, когда $f_b(V)$ имеет вид плато, сателлиты с фазовыми скоростями в области плато не развиваются.

В настоящей работе исследуется развитие волны БГК в длинной системе $L > \lambda^B$ в течение длительного времени до $t/T_{oe} \sim 300 - 500$, $\omega_{oet} \sim 2000 - 3000$. Рассматриваются два случая. В первом случае рассматривается волна БГК без пролетных электронов с функцией распределения $f_b(V)$ типа размытого пучка и с параметрами, удовлетворяющими условию $\alpha > 0.8$, так что развитие неустойчивости сателлитов возможно. Во втором случае рассматривается волна БГК с пролетными электронами, так что $f_b(V)$ имеет вид плато с резкими краями. В этом случае на начальной стадии сателлиты с фазовыми скоростями в области

плато не возбуждаются.

Показано, что в первом случае развивается неустойчивость сателлитов с $V_\phi^N < V_\phi^B$. Развитие неустойчивости приводит к захвату b -электронов гармониками-сателлитами и развитию сильной стохастической неустойчивости движения электронов. В результате этой неустойчивости функция распределения $f_b(V)$ уширяется. При этом становятся неустойчивыми все более и более коротковолновые гармоники-сателлиты, а функция распределения приобретает вид плато. В результате захвата некоторого числа электронов плазмы часть коротковолновых гармоник затухает и на фазовой плоскости устанавливается квазистационарная структура. В этой структуре благодаря сильной стохастической неустойчивости происходит интенсивное размешивание электронов в районе областей захвата волны БГК и гармоник-сателлитов и продолжают медленно расти граничные стохастические слои.

Во втором случае на начальной стадии становятся неустойчивыми коротковолновые гармоники-сателлиты с фазовыми скоростями на краю распределения $f_b(V)$. Эти гармоники растут очень медленно, но с течением времени их взаимодействие с волной БГК приводит к развитию стохастической неустойчивости движения электронов и размыванию края функции распределения. В результате становится возможной неустойчивость более длинноволновых сателлитов и развитие неустойчивости приобретает тот же характер, что и в первом случае.

Численный эксперимент выполняется методом частиц в ячейках. Рассматривается одномерная система с периодическими граничными условиями. Для электронов и ионов плазмы задается максвелловское распределение по скоростям с $T_e/T_i = 30$, $M/m = 10^{10}$, обрезанное на $V \sim \pm 2V_T$ из-за ограниченности числа счетных частиц ($N^e \sim 10^4$ на длине $100r_d$).

Для задания волны БГК задается ленгмюровская волна и ее область захвата равномерно заполняется электронами. Для более равномерного заполнения используется метод "взвешивания", при котором электрон дробится на β частиц с зарядом e/β , массой m/β , но с тем же e/m как у электрона, так что движение этих частиц не отличается от движения электронов. Эти частицы будем называть b -электронами. Более подробно метод задания волны БГК описан в работе [2].

В настоящей работе задается система длиной $L/r_d = 300$ и волна БГК с длиной волны $\lambda^B/r_d = 100$, так что номер гармоники волны БГК $N^B = L/\lambda^B = 3$. Рассматриваются два случая. В случае 1 задается волна БГК без пролетных частиц, так что функция распределения

b -электронов по скоростям на длине волны $\lambda^B f_b(V)$ имеет вид размытого пучка (рис. 1, а). Производная $f_b'(V)$ в этом случае положительна в области скоростей от $V_{\min}^B/V_T = (V_\phi^B - V_s^B)/V_T = 10.1$ ($V_s = 2\sqrt{\frac{e\Phi}{m}}$) до $V_\phi^B/V_T = 15.1$. В случае 2 задается волна БГК и пролетные частицы, так что $f_b(V)$ имеет вид плато с резкими краями (рис. 1, б). Плато занимает область от $V_{\min}^B/V_T = \frac{V_\phi^B - \Delta V}{V_T} = 7.9$ до $V_{\max}^B/V_T = \frac{V_\phi^B + \Delta V}{V_T} = 23.9$ ($\Delta V/V_T = 7.96$). Начальные параметры волны БГК в случаях 1 и 2 приведены в табл. 1.

В табл. 2 приведены фазовые скорости ленгмюровских волн-гармоник системы с $L/r_d = 300$.

Рассмотрим случай 1. В этом случае задается волна БГК с $\lambda^B/r_d = 100$; $N^B = 3$; $V_\phi^B/V_T = 15.1$; $V_{\min}^B/V_T = 10.1$. Параметры волны БГК в этом случае те же, что в случаях 1-1 и 1-4 в работе [1]. Случаи 1-1 и 1-4 отличаются от случая 1 тем, что в них задается затравочная ленгмюровская волна-гармоника $N = 4$ с фазовой скоростью $V_\phi^N/V_T = 12.1$, лежащей в области положительной производной $f_b(V)$ волны БГК — $V/V_T \sim 10.1 - 15.1$. Амплитуда ленгмюровской волны в случае 1-1 $E^N = 0.18$, в случае 1-4 $E^N = 0.70$ (здесь и далее E нормируется на mrd/eT_{oe}^2). В работе [1] показано, что в случаях 1-1, 1-4 развивается неустойчивость пучкового типа — неустойчивость сателлитов. Эта неустойчивость приводит к экспоненциальному росту амплитуды гармоники $N = 4$. Инкремент нарастания в случаях 1-1 и 1-4 практически одинаков — $\gamma/\omega_{oe} \sim 4 \cdot 10^{-2}$.

В случае 1 затравочная волна не задается, но и в этом случае наблюдается развитие неустойчивости того же типа, что и в случаях 1-1, 1-4 [1]. Действительно, в случае 1 практически с самого начала экспоненциально нарастает амплитуда гармоники $N = 4$, причем, инкремент нарастания на начальной стадии в $t/T_{oe} < 20$ имеет ту же величину, что и в случаях 1-1, 1-4 — $\gamma/\omega_{oe} \sim 4 \cdot 10^{-2}$.

На рис. 2 показана зависимость от времени амплитуды волны БГК $N = 3$ и гармоник от $N = 1$ до $N = 30$ в $t/T_{oe} \sim 0 - 100$. Поскольку гармоника $N = 4$ начинает развиваться от шумового уровня, ее амплитуда в течение длительного времени остается малой. Из рис. 2 видно, что амплитуда гармоники $N = 4$ достигает значительной величины к $t/T_{oe} \gtrsim 50$, а к $t/T_{oe} \gtrsim 80$ сравнивается с амплитудой волны БГК. В то же время амплитуды гармоник $N = 1, 2$ и $N > 7$ остаются малыми и не выходят за пределы уровня шумов ($E_{\max}^N \lesssim 1$).

Таблица 1

Начальные параметры волны БГК $L/r_d = 300$

Случай	$\frac{\lambda^B}{r_d}$	N_b^0	N'_b	n_b/n_e	N^B	V_Φ^B/V_T	E_0^B	V_s^B/V_T	$\frac{V_\Phi^B + V_s^B}{V_T}$	$\frac{V_\Phi^B - V_s^B}{V_T}$	$\frac{V_{\min}^B}{V_T}$
1	100	50	$1.35 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^{-3}$	3	15.09	15.6	5.01	20.10	10.08	10.08
2	100	50	$1.35 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^{-3}$	3	15.88	17.5	5.32	21.20	10.57	7.93

N_b^0, N'_b — число электронов и число "взвешенных" электронов на длине λ^B ; n_b — средняя плотность электронов на длине λ^B ; n_e — плотность электронов плазмы; $N^B = L/\lambda^B$ — номер гармоники; V_Φ^B, E_0^B — фазовая скорость и амплитуда волны БГК, E нормировано на mra/eT_{oe} ; $V_s = 2\sqrt{\frac{e\varphi}{m}}$; V_{\min}^B — минимальная скорость b -электронов $V_{\min}^B = V_\Phi^B - V_s^B$, в серии 2 $V_{\min}^B = V_\Phi^B - \Delta V$, $\Delta V/V_T = 7.96$

Таблица 2

Фазовые скорости ленгмюровских волн — гармоник системы с $L/r_d = 300$

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
λ^N/r_d	300	150	100	75	60	50	42.86	37.50	33.33	30.0
V_Φ^N/V_T	47.78	23.94	16.01	12.06	9.71	8.14	7.04	6.21	5.58	5.08
$N = L/\lambda^N$										

$N = L/\lambda^N$, λ^N , V_Φ^N — длина волны и фазовая скорость ленгмюровских волн.

Из рис. 3 видно, что до $t/T_{oe} \sim 50$ сохраняется энергия волны БГК (W_E — энергия поля, $\Delta W_e = W_e - W_e^0$, W_e — энергия электронов плазмы) и энергия захваченных b -электронов ($\Delta W_b = -(W_b - W_b^0)$), но в $t/T_{oe} > 50$ растут потери энергии b -электронов ΔW_b и энергия поля.

Развитие неустойчивости сателлитов было рассмотрено в работе [1] в случае 1–4. Было показано, что при развитии неустойчивости существенную роль играет захват b -электронов гармоникой-сателлитом и развитие сильной стохастической неустойчивости движения электронов. Такой же характер имеет развитие неустойчивости и в рассматриваемом случае 1. Это можно видеть по фазовым плоскостям электронов в разные моменты времени. На рис.4, 5 показаны фазовые плоскости электронов в виде, удобном для прослеживания развития стохастических эффектов. На этих рисунках не отмечаются частицы с начальными координатами x_0, V_0 , соответствующими одному сгустку b -электронов на длине $\Delta x = 1\lambda^B$ (рис.4) или двум сгусткам на длине $\Delta x = 2\lambda^B$ (рис.5, в этом случае отмечаются частицы сгустка, соответствующего "дырке" на рис.4 в $t/T_{oe} = 0$).

Из рис.4, 5 видно, что до $t/T_{oe} \sim 50$ вид фазовой плоскости практически не меняется — сохраняется форма сгустков b -электронов. Очень небольшое число b -электронов выходит из захвата и попадает в соседние области захвата волны БГК, свидетельствуя о развитии стохастического слоя [2, 3]. В $t/T_{oe} > 50$ начинается развитие сильной стохастической неустойчивости. На начальной стадии она проявляется в захвате b -электронов гармоникой-сателлитом $N = 4$. Это видно по фазовым плоскостям в $t/T_{oe} \sim 60 - 68$ (рис.4, 5). В это время распределение b -электронов заметно возмущается, появляются "хвосты" захваченных гармоникой $N = 4 b$ -электронов. В дальнейшем, ($t/T_{oe} \sim 66 - 72$) часть этих электронов вновь переходит в захват волны БГК $N = 3$. Одновременно растет число b -электронов, выходящих из захвата в своем сгустке и переходящих в соседние. Анализ траекторий b -электронов на фазовой плоскости показывает, что вышедшие из захвата электроны движутся стохастически — они то захватываются вновь, то остаются пролетными, то переходят в область захвата гармоники $N = 4$, то возвращаются в область захвата волны БГК. На фазовой плоскости такое поведение b -электронов проявляется в заполнении фазового пространства и размешивании электронов (рис.4, 5, $t/T_{oe} \sim 66 - 100$), так что к $t/T_{oe} \sim 100$ b -электроны из одного сгустка заполняют области захвата соседних (рис.5).

Так же как и в случае 1–4 [1] развитие сильной стохастической неустойчивости сопровождается вторичными нелинейными эффектами.

Так захват b -электронов гармоникой $N = 4$ с $V_\phi^N < V_\phi^B$ приводит к их торможению, так что потери энергии b -электронов ΔW_b растут (рис.3). Энергия передается волне $N = 4$, так что ее амплитуда продолжает расти, соответственно растут W_E и ΔW_e (рис.2, 3). Нарушение баланса — тормозящихся и ускоряющихся электронов приводит к появлению особых — пика на кривой $E^N(t)$ волны БГК (рис.2), но в дальнейшем амплитуда становится практически постоянной, так что рост энергии W_E , ΔW_e определяется ростом амплитуды гармоник-сателлитов.

Развитие сильной стохастической неустойчивости и перераспределение b -электронов приводит к изменению вида функции распределения по скоростям. Из рис.6 $t/T_{oe} \sim 60 - 100$ видно, что с течением времени функция распределения расплывается в сторону меньших скоростей, причем V_{min} уменьшается. При этом становится возможной сателлитная неустойчивость гармоники $N = 5$, так что в $t/T_{oe} > 70$ ее амплитуда растет (рис.2). Область захвата этой гармоники включается в область сильной стохастической неустойчивости. При этом V_{min} продолжает уменьшаться, так что в $t/T_{oe} > 80$ становится неустойчивой следующая гармоника $N = 6$ (рис.2). Ее область захвата также включается в область сильной стохастической неустойчивости и т.д. Это можно видеть по фазовым плоскостям рис.7, где показаны пробные частицы с $e = m = 0$ и e/m таким же как у электрона. В $t = 0$ задано две группы пробных частиц по 50 штук. Из рис.7 видно, что до $t/T_{oe} \sim 60$ все они остаются захваченными. В $t/T_{oe} > 60$ эти частицы принимают участие в стохастическом движении — разбрасываются по фазовой плоскости и попадают в область захвата гармоник $N = 4 - 5 - 6$ $V/V_T < V_{min}^B/V_T = 10.1$ ($V_\phi^N/V_T \sim 12.1 - 9.7 - 8.1$ соответственно).

Таким образом, волна БГК неустойчива относительно возбуждения гармоник-сателлитов как в случае 1-4 [1], когда задана затравочная ленгмюровская волна, так и в рассматриваемом случае 1, когда затравочной волны нет. В обоих случаях неустойчивость сателлитов включает в себя стадию пучковой неустойчивости и стадию сильной стохастической неустойчивости, которая приводит к вторичным нелинейным явлениям. Различие случаев 1 и 1-4 [1] проявляется только в большей продолжительности пучковой стадии в случае 1. Действительно, в случае 1 сильная стохастическая неустойчивость начинается в $t/T_{oe} > 50$, а в случае 1-4 [1] — в $t/T_{oe} \gtrsim 10$.

Развитие неустойчивости сателлитов в случае 1 прослеживалось в течение длительного времени $t/T_{oe} \sim 0 - 500$ ($\omega_{oe} t \sim 0 - 3000$). На рис.8 показана зависимость от времени амплитуды волны БГК $N = 3$ и амплитуды гармоник $N = 1 - 30$, на рис.9 — энергии W_E , ΔW_e , ΔW_b ,

на рис.10 — амплитуды гармоник $N = 7 - 10$. Из рис.8-10 видно, что основные события происходят в $t/T_{oe} \sim 50 - 100$. В $t/T_{oe} > 100$ развитие неустойчивости сателлитов продолжается. Из рис.6 $t/T_{oe} \sim 100 - 200$ видно, что функция распределения $f_b(V)$ продолжает уширяться в сторону меньших скоростей, так что становятся неустойчивыми все более и более коротковолновые гармоники-сателлиты (рис.8, 10). Их области захвата включаются в область сильной стохастической неустойчивости, что видно по смещению минимальных скоростей b -электронов и пробных частиц на фазовой плоскости рис.7. В табл. 3 приведено время t_1/T_{oe} начала роста гармоник-сателлитов по рисункам типа рис.2, 8, 10, а также время, когда амплитуда гармоники становится в среднем постоянной или достигает максимума, — t_2/T_{oe} и время, когда амплитуда начинает падать, — t_3/T_{oe} .

Таблица 3

N	4	5	6	7	8	9	10
t_1/T_{oe}	50	70	80	85	85	140	130
t_2/T_{oe}	80-500	150-500	200	120-330	140-300	180-270	180-230 380
			300-500		400-500	360-500	450-500
t_3/T_{oe}	-	-	-	330	300	270	230 380

Из табл.3 видно, что возбуждение новых гармоник происходит до $t/T_{oe} \sim 150$. Размешивание b -электронов на фазовой плоскости при сильной стохастической неустойчивости приводит к тому, что на функции распределения $f_b(V)$ образуется плато (рис.6 $t/T_{oe} > 100$). При этом амплитуда гармоник с V_ϕ^N в районе плато $f_b(V)$ становится в среднем постоянной, так что кривые $E^N(t)$ в $t/T_{oe} \gtrsim 100 - 300$ выходят на постоянный уровень (рис.8, табл.3). Постоянство амплитуды гармоник-сателлитов в условиях интенсивного размешивания электронов на фазовой плоскости показывает, что гармоники также становятся волнами БГК.

В $t/T_{oe} > 150$ начинается захват электронов плазмы (назовем их p -электроны) коротковолновыми гармониками-сателлитами. Это видно по пересечению функции распределения $f_e(V)$ и $f_b(V)$ p - и b -электронов (рис.6, $t/T_{oe} \geq 150$), по пересечению областей на фазовой плоскости, занятых p - и b -электронами (рис.7, $t/T_{oe} \geq 200$), а также по рис.11. На рис.11 показана зависимость от времени максимальной V_{max}^b и минимальной V_{min}^b скорости b -электронов и максимальной скорости V_{max}^e p -электронов. Видно, что максимальная скорость p -электронов начинает расти в $t/T_{oe} > 150$. При этом V_{max}^e становится больше V_{min}^b , что свидетельствует о том, что p -электроны попадают в область фазовой плоско-

сти, где развивается сильная стохастическая неустойчивость. Рост V_{\max}^e в $t/T_{oe} \sim 150 - 300$ показывает, что p -электроны участвуют в сильной стохастической неустойчивости, причем, некоторые из них ускоряются до скоростей $V \sim V_{\max}^b$.

Захват и ускорение p -электронов приводит к поглощению ими энергии поля. Действительно, по рис. 9 видно, что в $t/T_{oe} > 150 - 200$ энергия p -электронов ΔW_e растет, а энергия поля W_E падает. Однако, полного затухания поля не происходит. По кривым $E^N(t)$ рис.8, 10 видно, что в $t/T_{oe} > 200$ затухают коротковолновые гармоники $N \geq 7$. Однако их амплитуда не падает до нуля. Как видно из рис.8, 10 и табл.3, к $t/T_{oe} > 350 - 400$ амплитуда этих гармоник выходит на постоянный уровень.

На рис.12 показана зависимость от времени числа p -электронов со скоростями $V^e > \tilde{V}_0^e$ ($\tilde{V}_0^e/V_T \sim 2.5$ — начальная возмущенная скорость p -электронов). Это число ΔN_e характеризует число захваченных p -электронов. Из рис.12 видно, что в $t/T_{oe} > 200$ это число практически не меняется. В то же время становится практически постоянной энергия b -электронов (рис.9). В $t/T_{oe} > 200 - 300$ устанавливаются на постоянном, в среднем, уровне амплитуды основных гармоник-сателлитов, $N = 4 - 6$, а в $t/T_{oe} > 400$ — и амплитуды коротковолновых гармоник (рис.8, 10). На фазовой плоскости в $t/T_{oe} \gtrsim 200 - 300$ устанавливается структура, вид которой практически не меняется до $t/T_{oe} \sim 500$.

Совокупность этих фактов показывает, что захват некоторого числа p -электронов приводит к затуханию коротковолновых гармоник и установлению их амплитуды на меньшем уровне. Это приводит к прекращению захвата новых p -электронов, так что ΔN_e перестает расти. На фазовой плоскости образуется квазистационарная структура, состоящая из БГК-волны — исходной БГК-волны и гармоник-сателлитов. b - и p -электроны, поддерживающие эту структуру, участвуют в сильной стохастической неустойчивости в области, ограниченной скоростями V_{\min}^b и V_{\max}^b . Примерное равенство числа ускоряющихся и числа тормозящихся электронов поддерживает стационарность этой структуры, так что она является структурой БГК-типа. Отметим, что образование квазистационарной структуры такого же типа наблюдалось нами ранее [3] при изучении сильной стохастической неустойчивости при взаимодействии волны БГК с ленгмюровской волной.

Дальнейшее развитие этой структуры определяется медленными стохастическими процессами — ростом стохастического слоя. Действительно, из рис.11, 12 видно, что V_{\min}^b продолжает медленно уменьшаться, а число захваченных p -электронов медленно растет.

Рассмотрим случай 2. В этом случае кроме волны БГК задаются пролетные частицы, так что начальная функция распределения b -электронов имеет вид плато с резкими краями (рис.1, б). Основные параметры волны БГК: $\lambda^B/r_d = 100$; $N^B = 3$; $V_\phi^B/V_T = 15.9$; $V_3^B/V_T = 5.3$. Плато занимает область скоростей от $V_{\min}^b/V_T = 7.9$ до $V_{\max}^b/V_T = 23.9$, так что фазовые скорости гармоник-ленгмюровских волн $N = 4 - 6$ лежат в области плато, а $V_\phi^{VII}/V_T = 7.0 \lesssim V_{\min}^b/V_T$.

Развитие волны БГК в $t/T_{oe} \sim 0 - 100$ в этом случае отличается от случая 1. Это видно из рис.13–18, где показана зависимость от времени амплитуды волны БГК и гармоник $N = 1 - 30$ (рис.13), $W(t)$ (рис.14), $E^N(t)$ для гармоник $N = 4 - 7$ (рис.15), а также приведены фазовые плоскости электронов и функции распределения электронов плазмы и b -электронов в разные моменты времени (рис.16–18) в случае 2. Фазовые плоскости рис.16, 17 приведены в виде, аналогичном рис.4, 5 — на рис.16 не отмечаются частицы с начальными координатами x_0, V_0 , соответствующими одному сгустку и пролетным b -электронам на длине $\Delta x = 1\lambda^B$, на рис.17 — двум сгусткам и пролетным частицам на длине $\Delta x = 2\lambda^B$.

Из рис.13–15 видно, что до $t/T_{oe} \sim 100 - 150$ сохраняется амплитуда и энергия волны БГК $N = 3$, энергия b -электронов, не нарастают амплитуды гармоник $N = 4 - 6$ с фазовыми скоростями в области плато $f_b(V)$. Это подтверждает пучковый характер начальной стадии неустойчивости сателлитов. Действительно, в случае 1, когда $f_b(V)$ имеет вид размытого пучка, неустойчивость наблюдается, а в случае 2, когда $f_b(V)$ имеет вид плато, ее нет.

Последнее утверждение относится к гармоникам $N = 4 - 6$. Гармоника $N = 7$ с $V_\phi^N \lesssim V_{\min}^b$ ведет себя по другому. Из рис.13, 15 видно, что эта гармоника начинает нарастать и ее амплитуда достигает заметной величины уже в $t/T_{oe} \gtrsim 50$. Таким образом, развитие неустойчивости сателлитов в случае 2 начинается с развития гармоники $N = 7$ с фазовой скоростью, близкой к краю распределения $f_b(V)$, что также указывает на пучковый характер неустойчивости.

Развитие гармоники $N = 7$ приводит к возмущению волны БГК и развитию стохастической неустойчивости вблизи от сепаратрисы волны БГК. Это видно по возмущению пролетных b -электронов на фазовой плоскости при сохранении формы сгустка в $t/T_{oe} \sim 50 - 100$ (рис.17). Развитие стохастической неустойчивости приводит к тому, что край функции распределения расплывается (рис.18, $t/T_{oe} = 100$). В результате становится неустойчивой гармоника $N = 6$. Из рис.15 видно, что ее амплитуда начинает расти в $t/T_{oe} \gtrsim 100$. Это приводит к ускорению раз-

вития стохастической неустойчивости и дальнейшему расплыванию края функции распределения. В результате, в $t/T_{oe} \gtrsim 140$ становится неустойчивой гармоника $N = 5$, в $t/T_{oe} \gtrsim 170$ — гармоника $N = 4$ (рис.15). В результате развивается сильная стохастическая неустойчивость, которая приводит к размешиванию b -электронов на фазовой плоскости (рис.16, 17). Одновременно начинают развиваться и более коротковолновые гармоники $N = 8 - 9$ и т.д. Время начала роста амплитуды гармоник приведено в табл.4.

Таблица 4

N	4	5	6	7	8	9	10
t_1/T_{oe}	170	140	100	50	140	180	170
t_2/T_{oe}	280	240	220	250	220	280	270
t_3/T_{oe}	—	—	—	—	—	280	270

t_1 — начало роста по рис.13, 15, t_2 — насыщение кривых $E^N(t)$, t_3 — начало затухания.

Сильная стохастическая неустойчивость развивается в области фазовой плоскости, включающей все области захвата возбуждающихся гармоник. Это видно, по рис.19, где показана зависимость от времени минимальной и максимальной скоростей b -электронов, а также максимальной скорости p -электронов. Из рис.19 видно, что V_{\min}^b уменьшается до величины примерно нулевой, так что область, куда попадают b -электроны, за- ведомо включает области захвата гармоник $N = 10 - 13$ с $V_\phi^N/V_T \sim 4 - 5$.

Развитие сильной стохастической неустойчивости приводит в $t/T_{oe} > 170$ к росту потерь энергии b -электронов (рис.14), но к $t/T_{oe} \gtrsim 280$ потери перестают расти. Из таблицы 4 и рис.13, 15 видно, что в $t/T_{oe} > 200 - 280$ амплитуда основных гармоник также становится постоянной. Это свидетельствует о превращении гармоник в волны БГК и об образовании квазистационарной структуры на фазовой плоскости.

Дальнейшее ее развитие связано с захватом и ускорением некоторого числа электронов плазмы коротковолновыми гармониками. Действительно, из рис.19 видно, что в $t/T_{oe} > 200$ начинает расти максимальная скорость p -электронов, причем, V_{\max}^e становится больше V_{\min}^b , так что p -электроны попадают в область сильной стохастической неустойчивости. Захват и ускорение p -электронов приводят к поглощению

ими энергии поля. Однако, до $t/T_{oe} \sim 300$ эффект невелик, что видно из рис.14.

Таким образом, общий характер процесса в случае 2 не отличается от случая 1. Сильно различается только начальная стадия. В случае 1 с функцией распределения типа размытого пучка неустойчивость сателлитов начинается с развития длинноволновых гармоник $N = 4 - 5$ с фазовыми скоростями, близкими к фазовой скорости волны БГК. В результате, довольно скоро развивается сильная стохастическая неустойчивость движения электронов и развиваются вторичные нелинейные эффекты, приводящие к расплыванию функции распределения и возбуждению новых гармоник-сателлитов. В случае 2 пролетные частицы, сглаживая функцию распределения, затрудняют развитие неустойчивости сателлитов. До тех пор пока функция распределения имеет вид плато гармоники с фазовыми скоростями в области плато не возбуждаются. Развитие неустойчивости сателлитов в этом случае начинается с развития гармоники $N = 7$ с фазовой скоростью вблизи края распределения. Медленное развитие стохастической неустойчивости приводит к нелинейным эффектам того же типа, что и в случае 1. В результате размывается функция распределения и становится возможным возбуждение более длинноволновых $N = 6 - 5 - 4$ и более коротковолновых $N = 8 - 9 - 10$ гармоник. Развитие сильной стохастической неустойчивости приводит к формированию квазистационарной структуры на фазовой плоскости, так же как в случае 1.

Таким образом, хотя последовательность возбуждения гармоник-сателлитов и соотношение их амплитуд в установившемся состоянии различаются в случаях 1 и 2, но, в целом, характер процесса оказывается одинаковым.

В работе [4] исследовались волны БГК типа electron hole, представляющие собой кольца захваченных электронов на фазовой плоскости. Было показано, что в системе $L > \lambda^B$ такая волна неустойчива относительно слияния колец в более длинноволновую структуру. Возникает вопрос о существовании неустойчивости слияния в случае волны БГК рассматриваемого типа (сгустки захваченных электронов).

Неустойчивость должна проявляться в слиянии сгустков на фазовой плоскости и в перекачке энергии из волны БГК $N = 3$ в более длинноволновые гармоники $N = 1$ и 2. На основании приведенных выше результатов можно утверждать, что в рассмотренных случаях 1 и 2 неустойчивость слияния не проявляется. Действительно, не наблюдается заметного уменьшения амплитуды волны БГК, амплитуда гармоник

$N = 1$ и 2 остается на уровне шумов. Не наблюдается и слияния сгустков за время пока не развилась сильная стохастическая неустойчивость — $t/T_{oe} \sim 0 - 60$ ($\omega_{oe} t \sim 300$) в случае 1 , $t/T_{oe} \sim 0 - 100$ ($\omega_{oe} t \sim 600$) в случае 2 .

Таким образом, можно утверждать, что в рассмотренных случаях неустойчивости слияния или нет, или ее скорость развития много меньше, чем у неустойчивости сателлитов.

Литература

1. Г.А. Артин, Н.С. Бучельникова, Б.Н. Лазеев. Волна Бернштейна–Грина–Крускала в длинной системе. I. Неустойчивость сателлитов. Препринт ИЯФ 95-23, 1995.
2. Н.С. Бучельникова, Б.Н. Лазеев. Волна Бернштейна–Грина–Крускала. I. Препринт ИЯФ 93-97, 1993.
3. Н.С. Бучельникова, Б.Н. Лазеев. Волна Бернштейна–Грина–Крускала. II. Препринт ИЯФ 93-98, 1993.
4. A. Ghizzo, B. Izrar, P. Bertrand, E. Fijalkow, M.R. Feix, M. Shoucri. Phys. Fluids 31(1), 72, 1988.

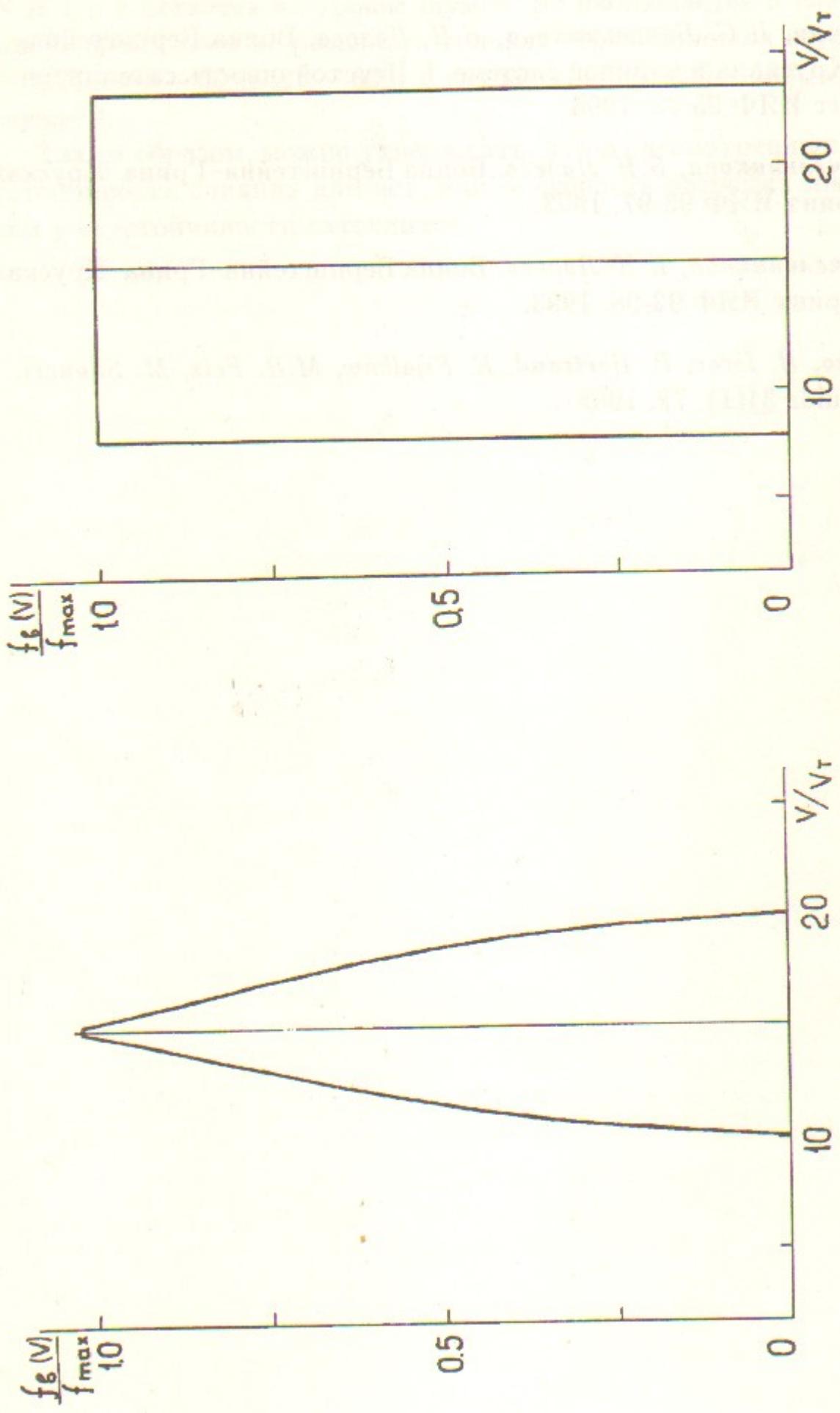


Рис. 1. Начальная функция распределения по скорости b -электронов на длине волны БГК λ^B . а) Случай 1. $V_\Phi^B/V_T = 15.1$; $V_{\min}^B/V_T = 10.1$; $f_{\max} = 10.1$; $\Delta V/V_T = 329$; $\Delta V/V_T = 0.32$. б) Случай 2. $V_\Phi^B/V_T = 15.9$; $V_{\min}^B/V_T = 7.9$; $f_{\max} = 135$; $\Delta V/V_T = 0.32$.

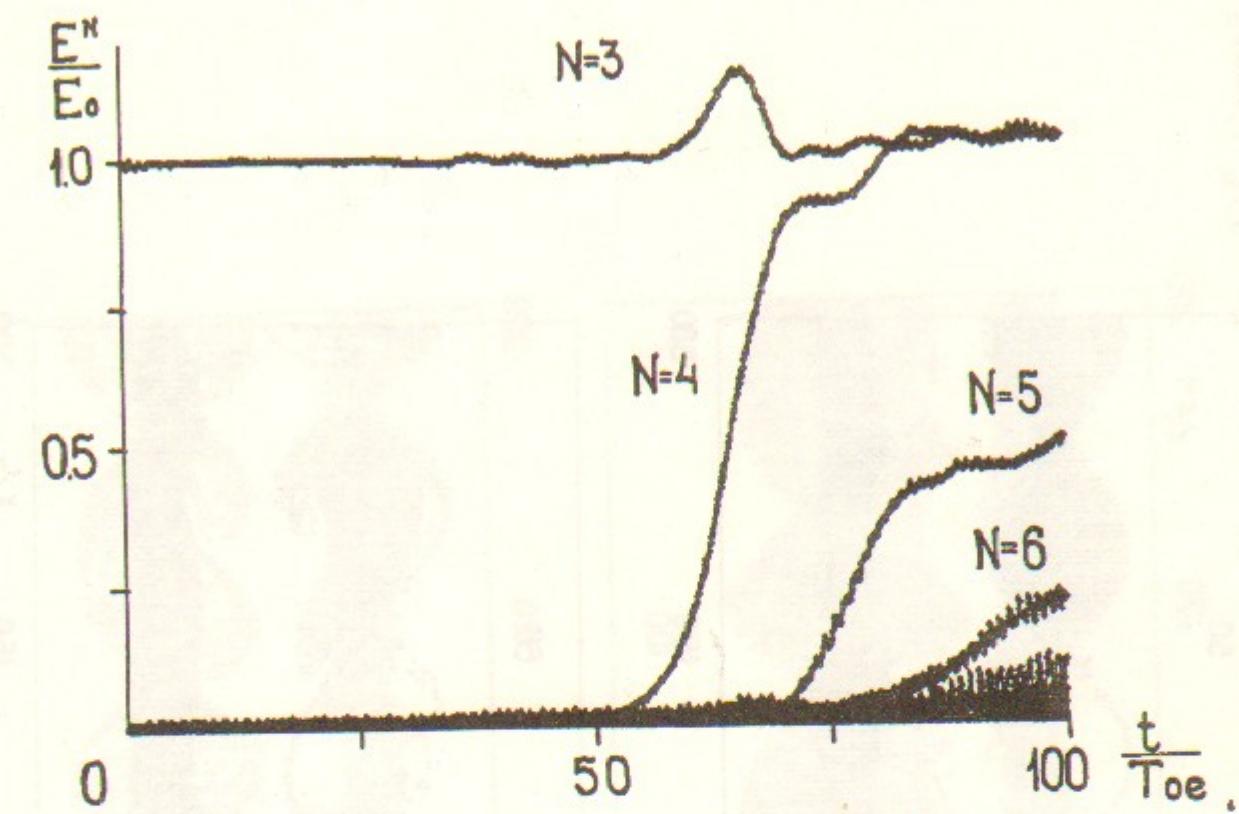


Рис. 2. Зависимость от времени амплитуды волны БГК $N = 3$ и гармоник $N = 1 - 30$. Случай 1. $E_0/(mr_d/eT_{oe}^2) = 15.6$.

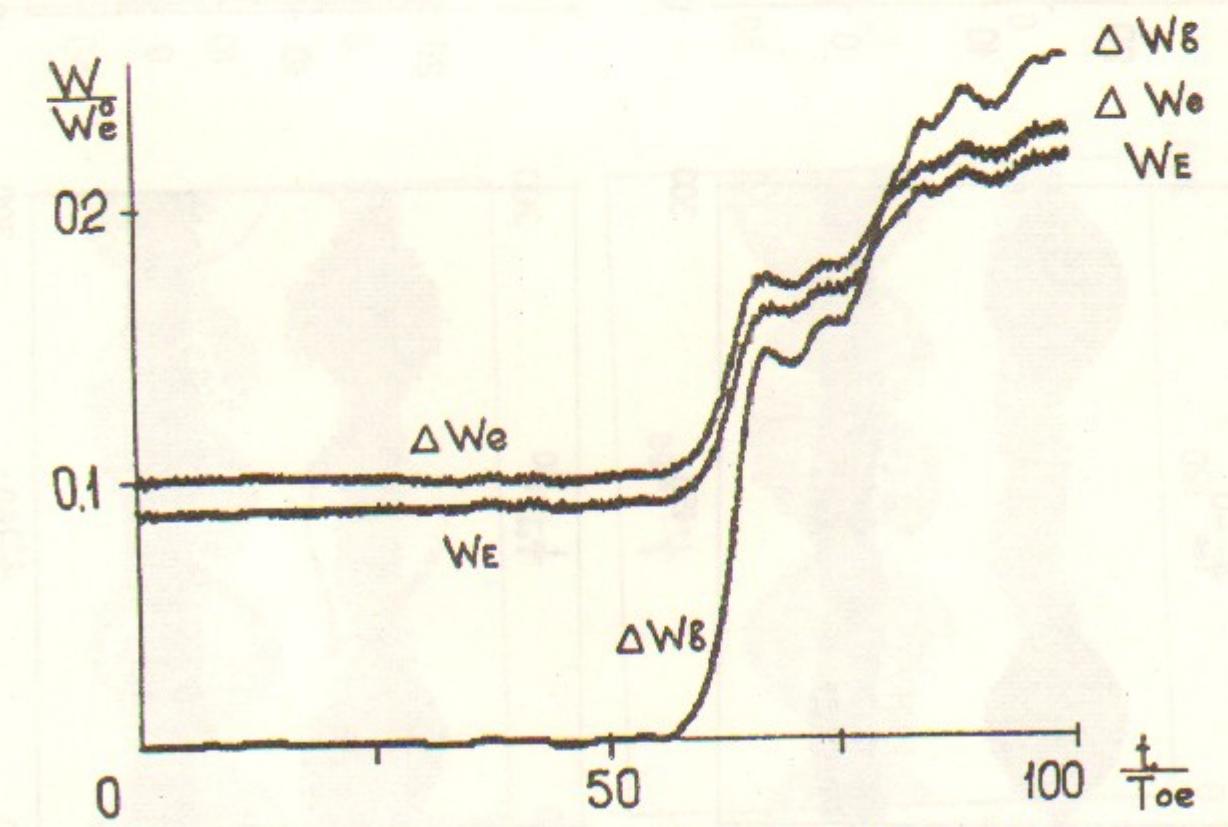


Рис. 3. Зависимость от времени энергии поля W_E , энергии электронов плазмы $\Delta W_e = W_e - W_e^0$ (W_e^0 — тепловая энергия) и потерь энергии b -электронов $\Delta W_b = -(W_b - W_b^0)$. Случай 1.

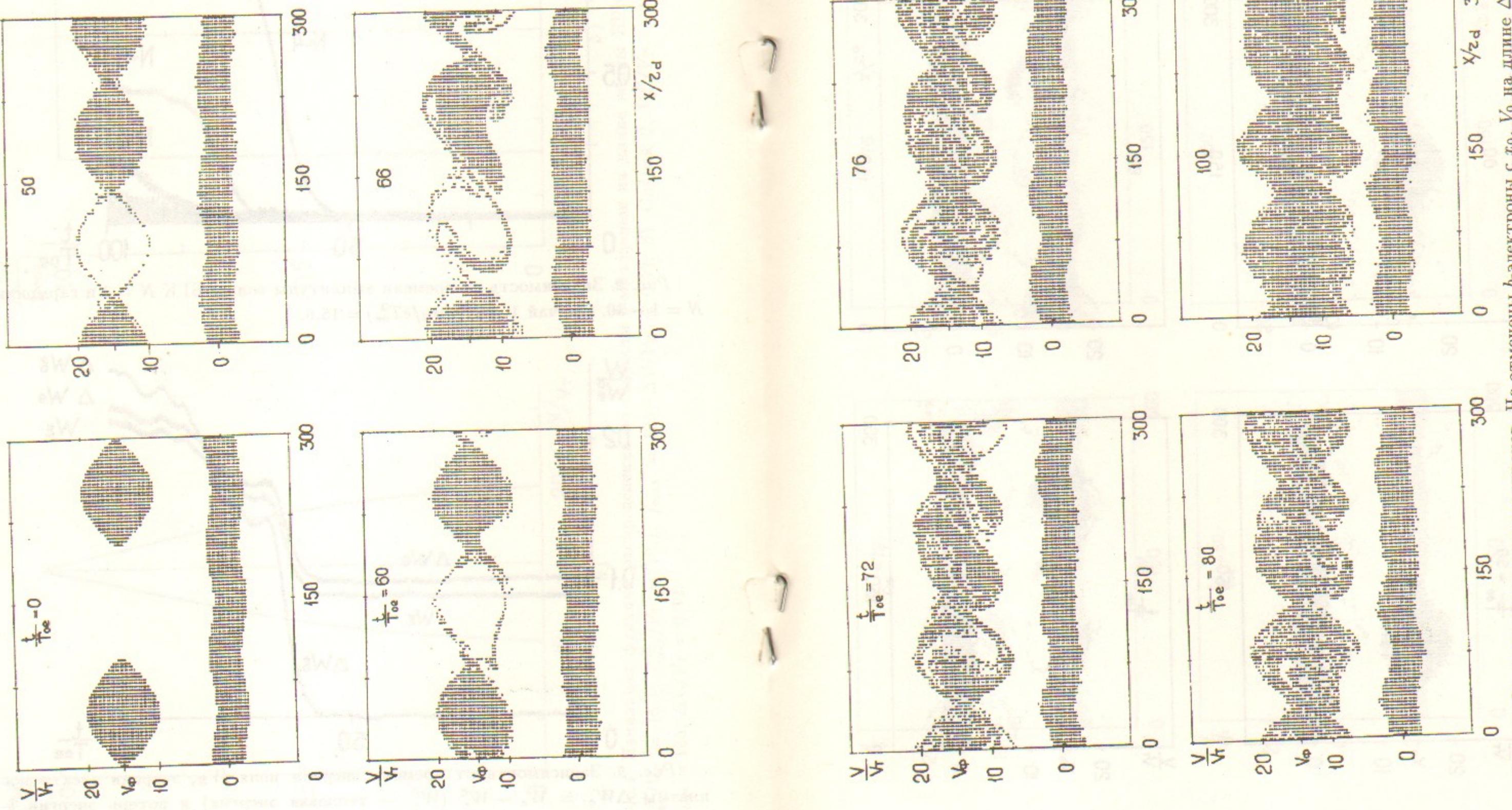


Рис. 4. Фазовые плоскости электронов. Не отмечены b -электроны с x_0 , V_0 на длине $\Delta x = 1\lambda^B$. Случай 1.

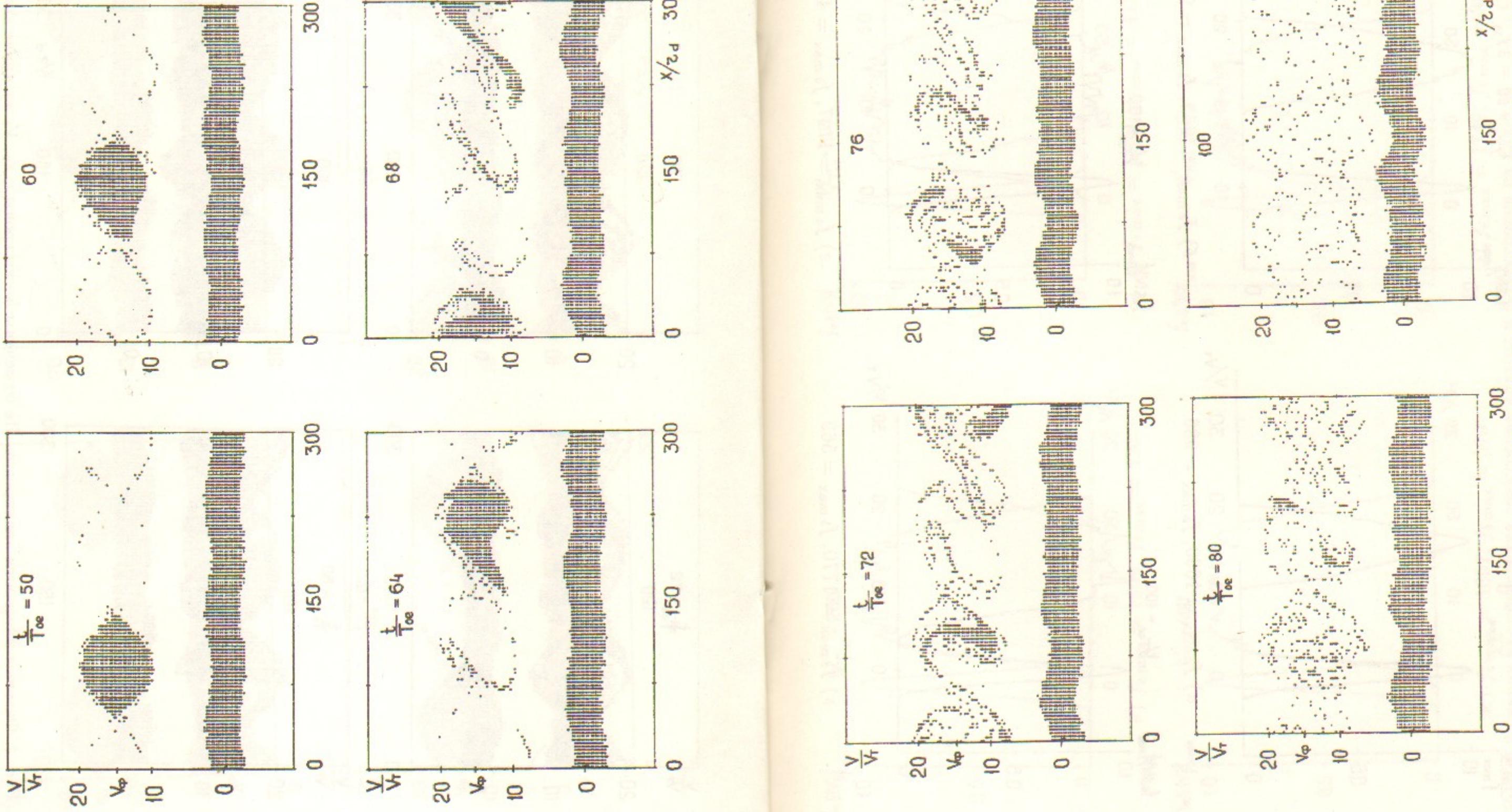
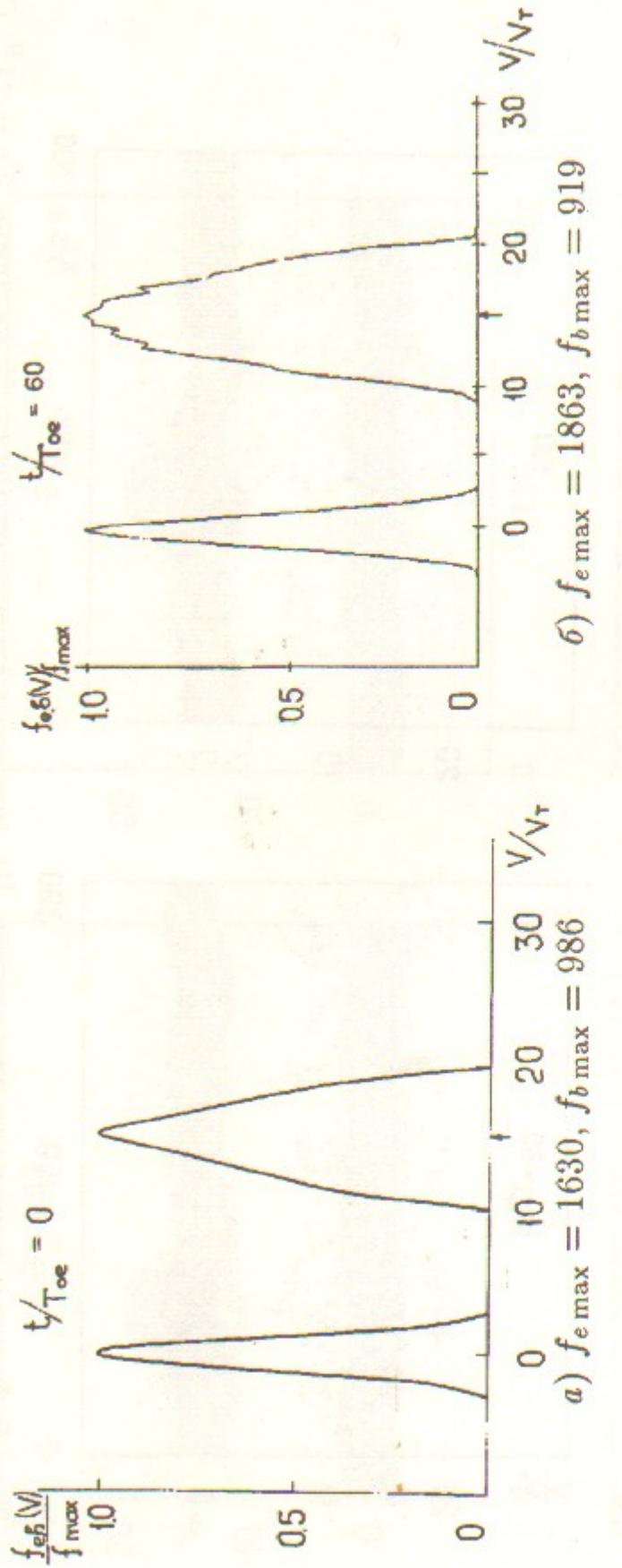
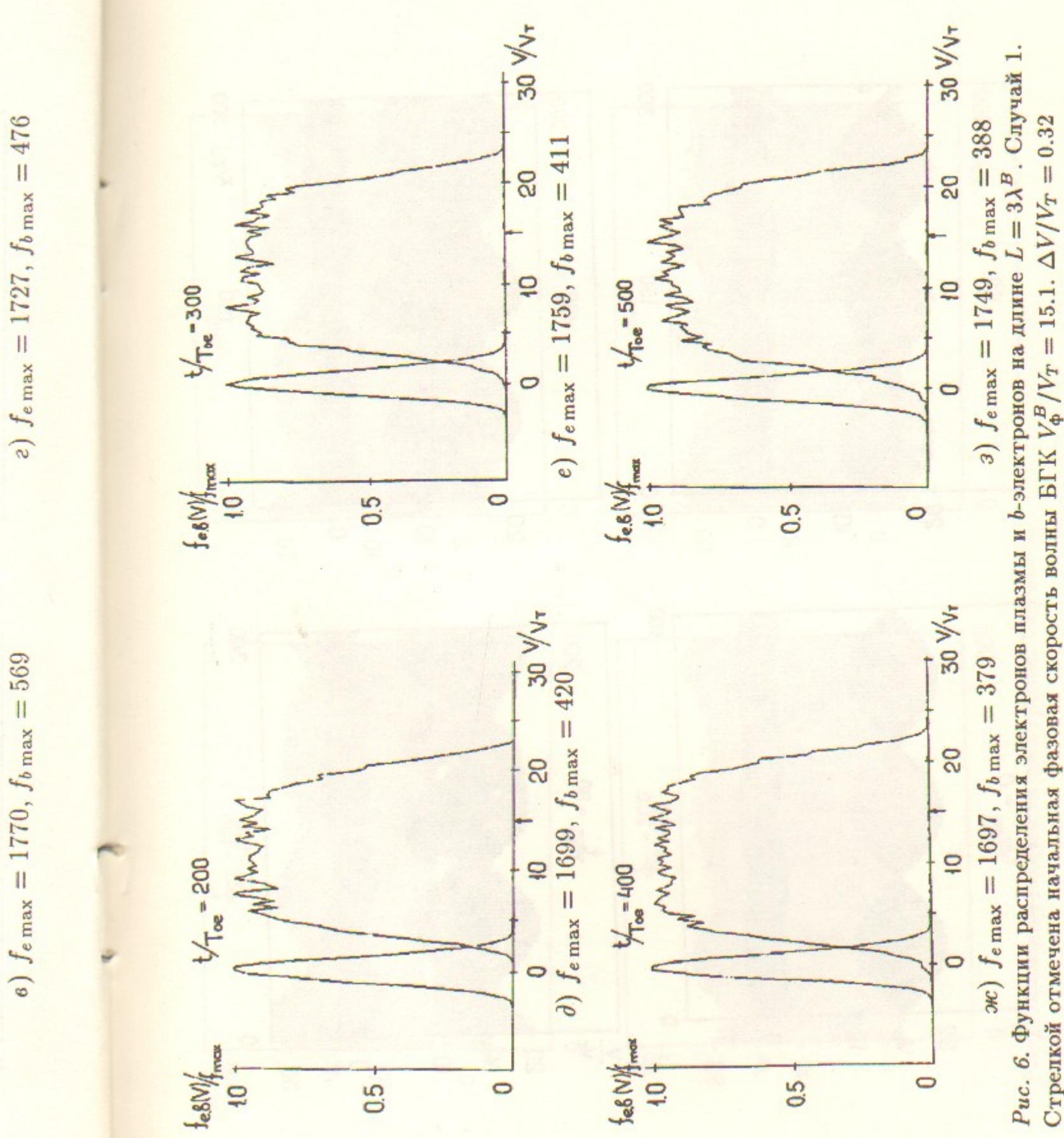


Рис. 5. Фазовые плоскости электронов. Не отмечены b -электроны на линии $\Delta x = 2\lambda^B$. Случай 1.



24



25

Рис. 6. Функции распределения электронов плазмы и b -электронов на длине $L = 3\lambda_B$. Случай 1. Стрелкой отмечена начальная фазовая скорость волны БГК $V_\Phi^B/V_T = 15.1$. $\Delta V/V_T = 0.32$

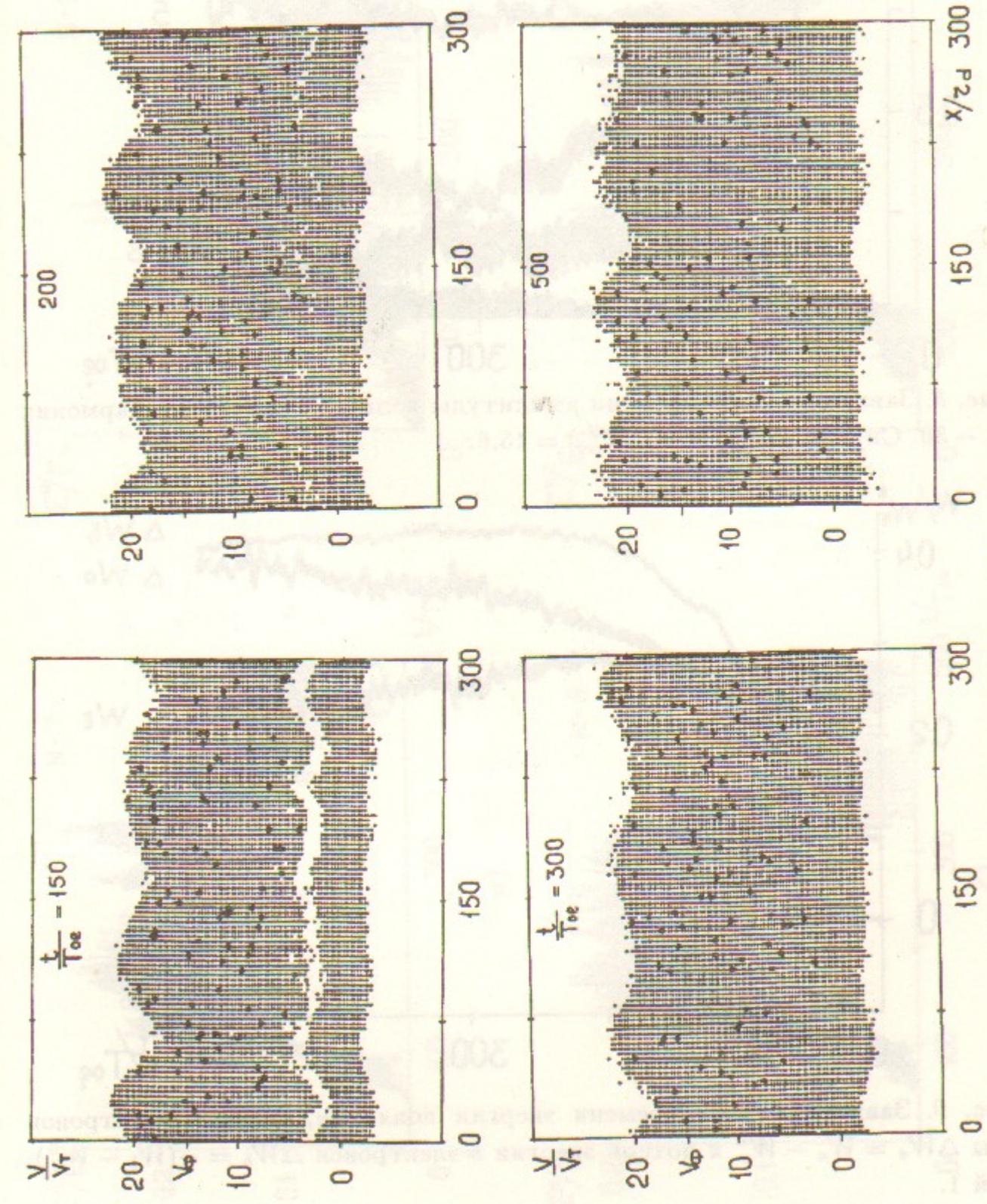
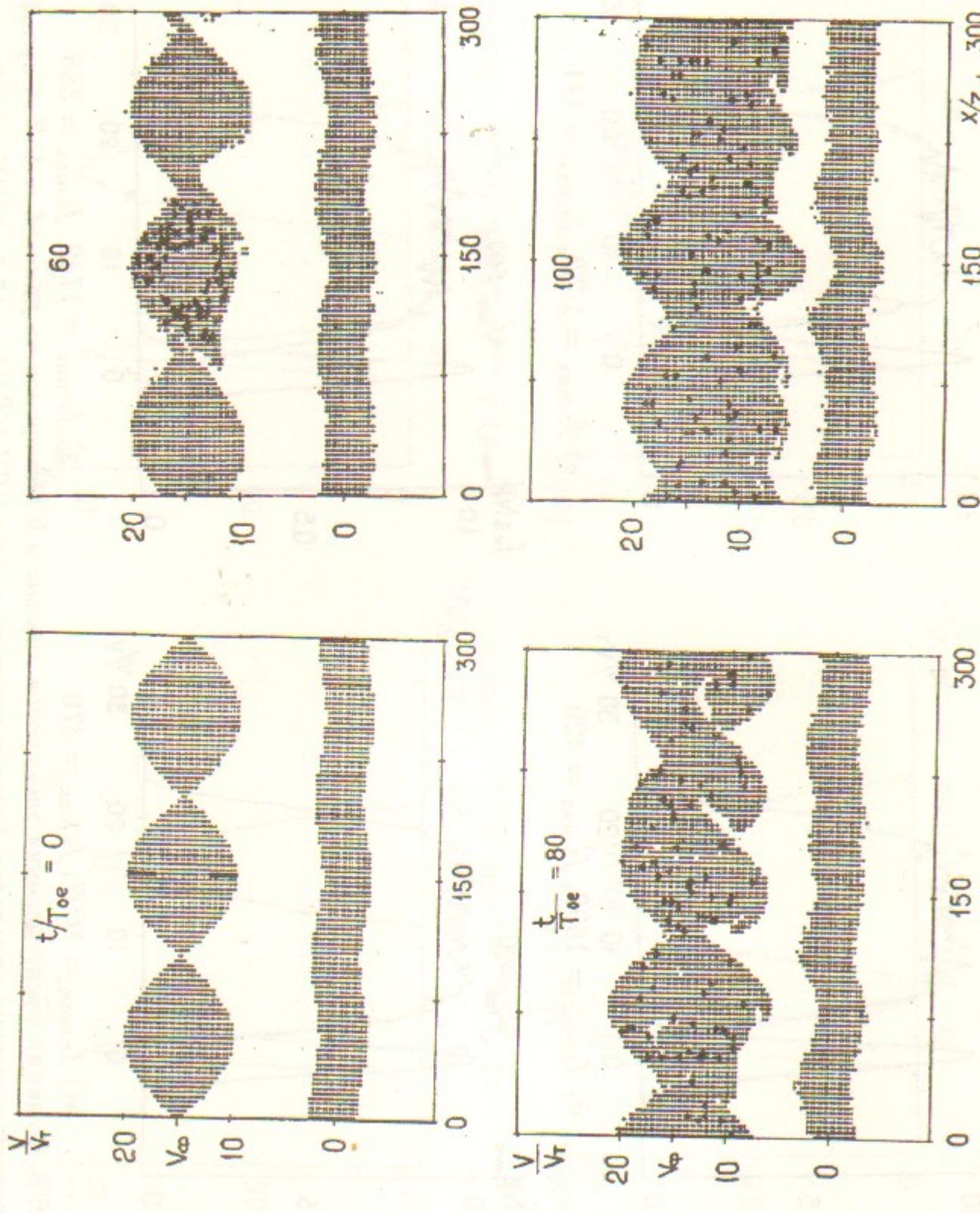


Рис. 7. Фазовые плоскости электронов. Случай 1.

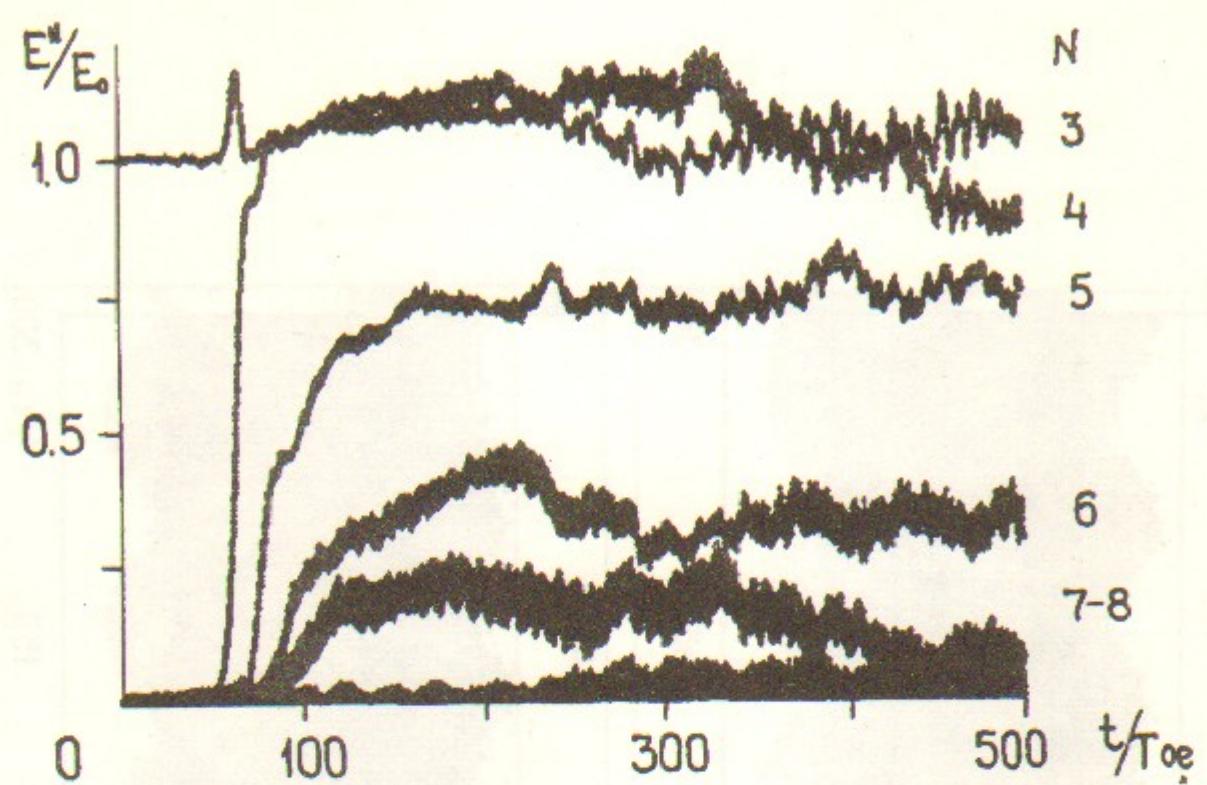


Рис. 8. Зависимость от времени амплитуды волны БГК $N = 3$ и гармоник $N = 1 - 30$. Случай 1. $E_0/(mr_d/eT_{oe}^2) = 15.6$.

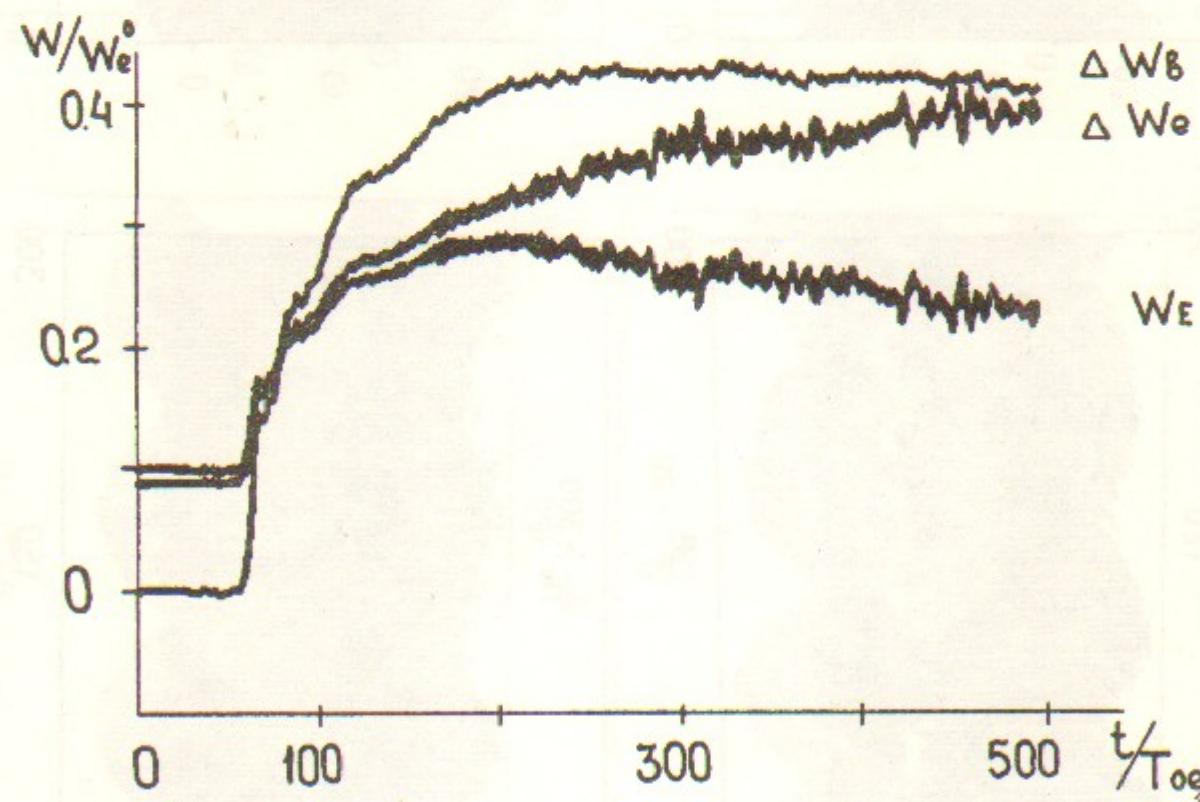


Рис. 9. Зависимость от времени энергии поля W_E , энергии электронов плазмы $\Delta W_e = W_e - W_e^0$ и потерь энергии b -электронов $\Delta W_b = -(W_b - W_b^0)$. Случай 1.

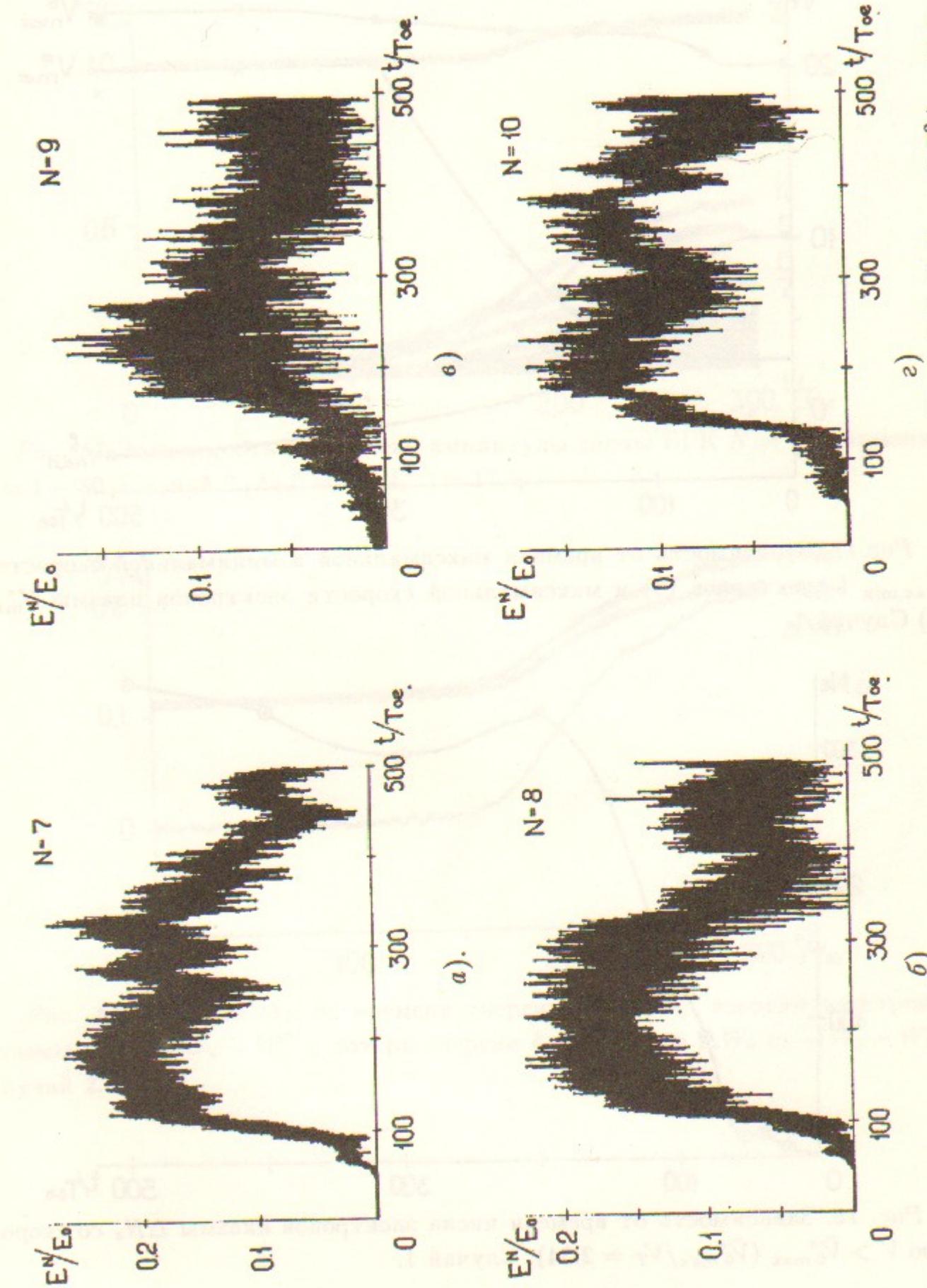


Рис. 10. Зависимость от времени амплитуды гармоник-сателлитов. Случай 1. $E_0/(mr_d/eT_{oe}^2) = 15.6$.

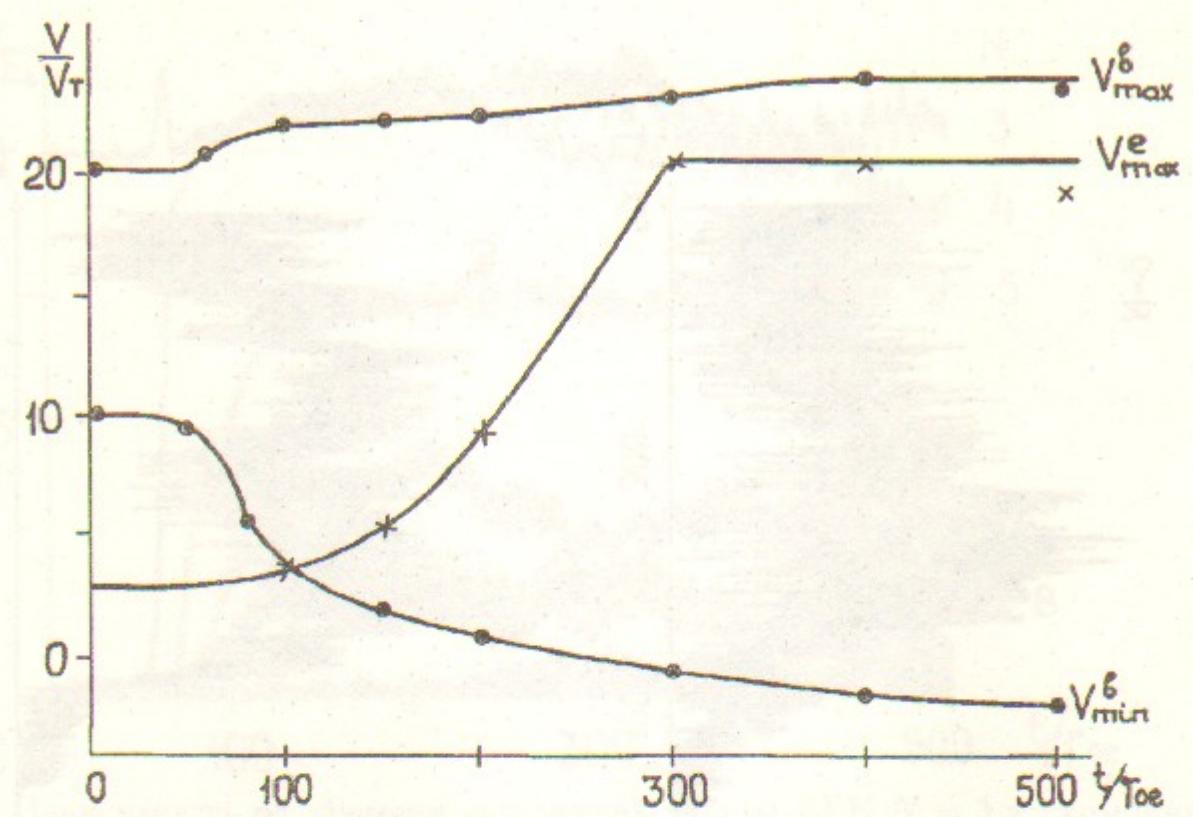


Рис. 11. Зависимость от времени максимальной и минимальной скоростей $V_{\max,\min}^b$ b -электронов (○) и максимальной скорости электронов плазмы V_{\max}^e (×) Случай 1.

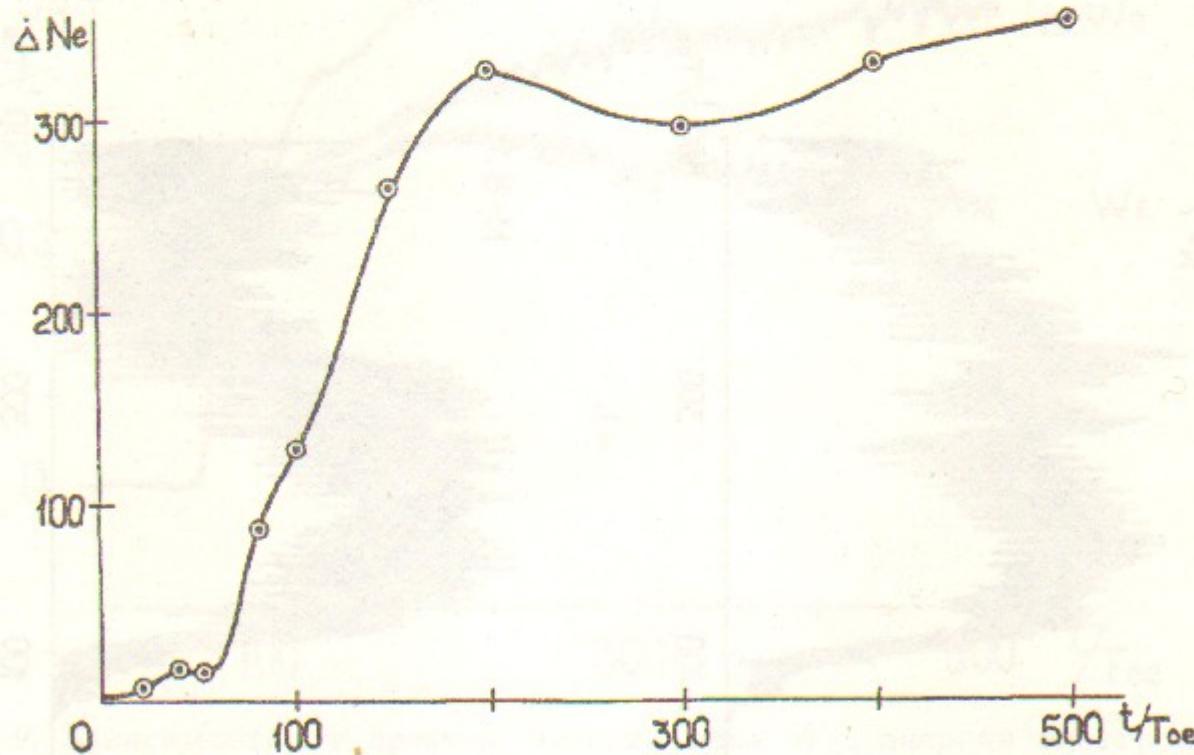


Рис. 12. Зависимость от времени числа электронов плазмы ΔN_e со скоростью $V > \hat{V}_{0\max}^e$ ($\hat{V}_{0\max}^e/V_T = 2.54$). Случай 1.

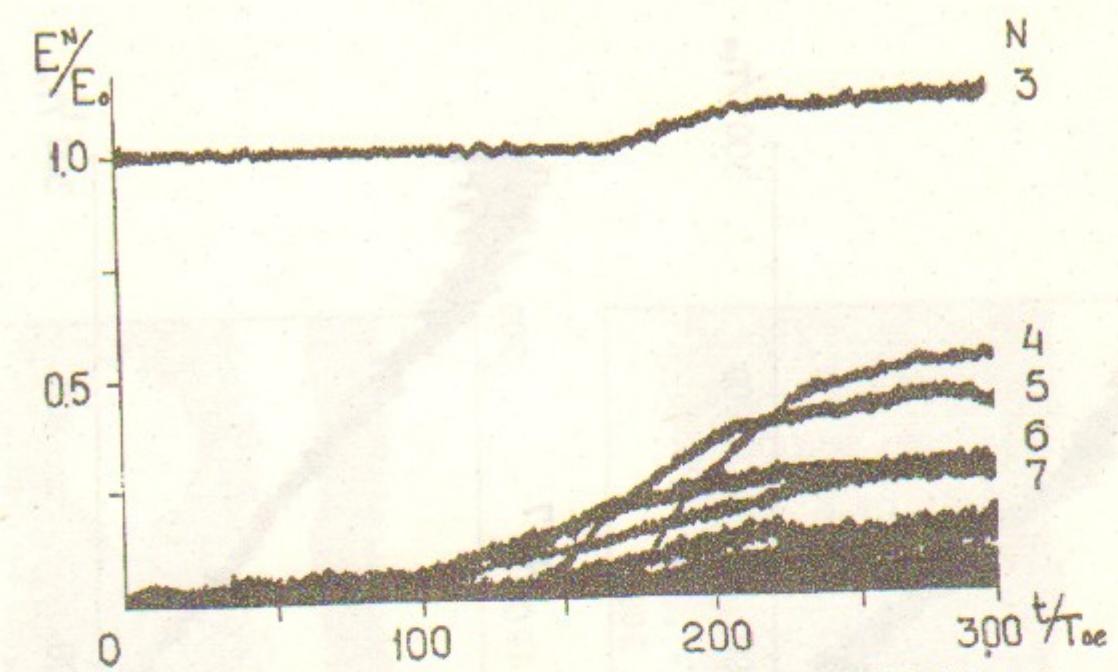


Рис. 13. Зависимость от времени амплитуды волны БГК $N = 3$ и гармоник $N = 1 - 30$. Случай 2. $E_0/(mr_d/eT_{oe}^2) = 17.5$.

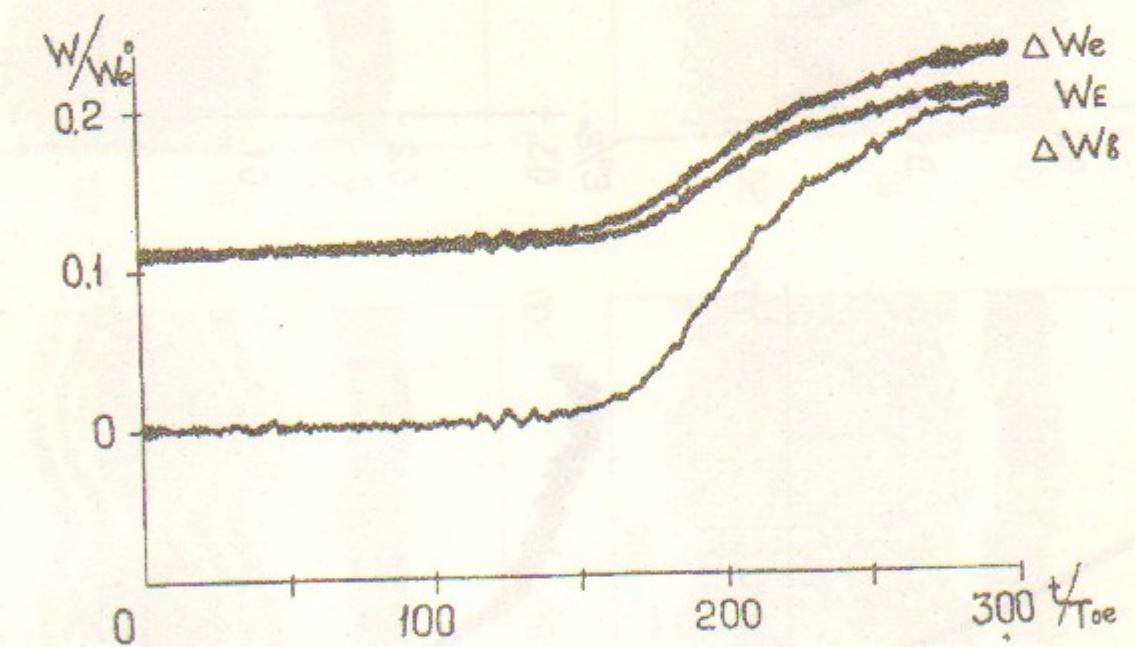


Рис. 14. Зависимость от времени энергии поля W_E , энергии электронов плазмы $\Delta W_e = W_e - W_e^0$ и потерь энергии b -электронов $\Delta W_b = -(W_b - W_b^0)$. Случай 2.

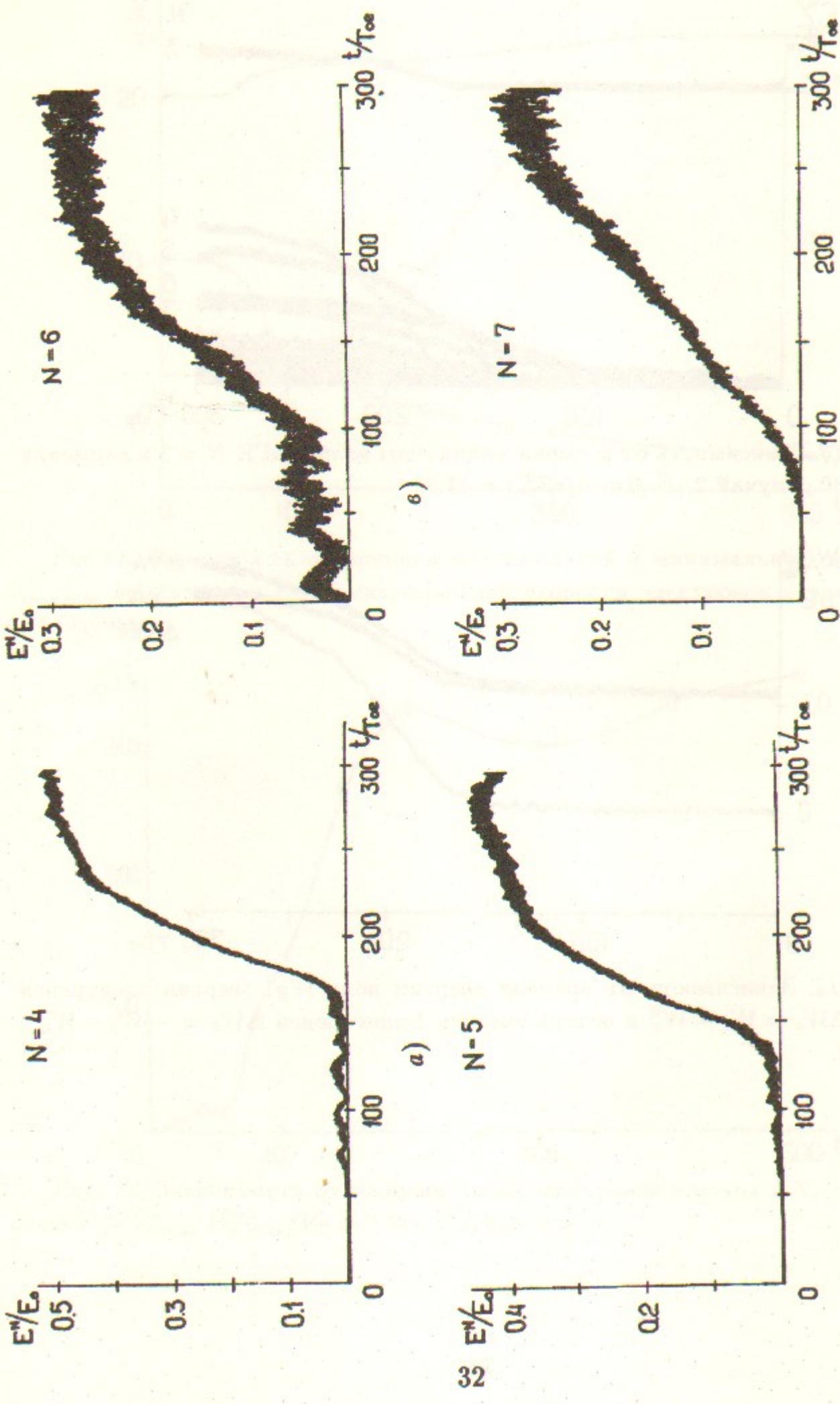


Рис. 15. Зависимость от времени амплитуды гармоник-сателлитов Случай 1. $E_0/(mrd/eT_{oe}^2) = 15.6$.

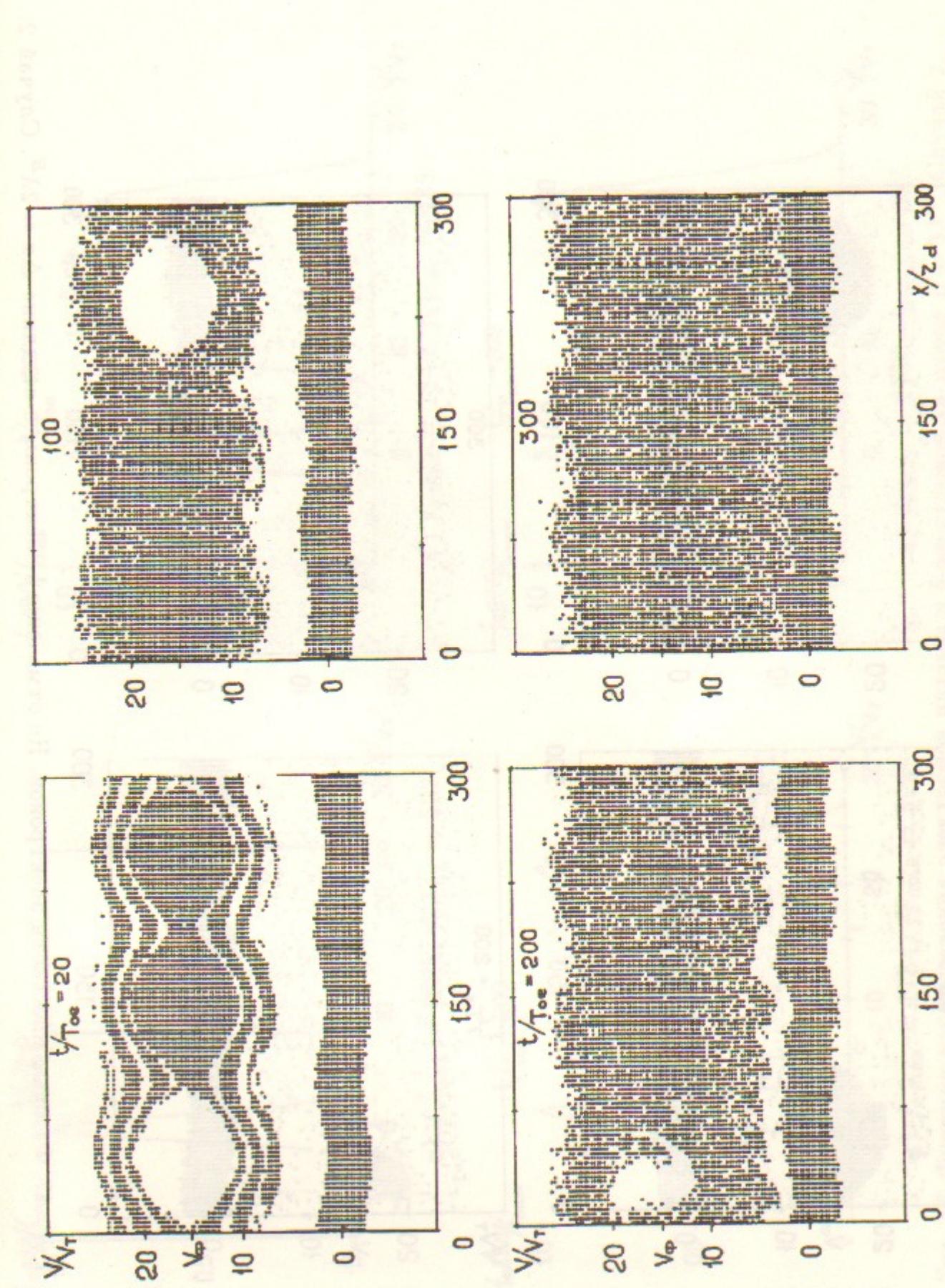


Рис. 16. Фазовые плоскости электронов. Не отмечены b -электроны с на длине $\Delta x = 1\lambda^B$. Случай 2.

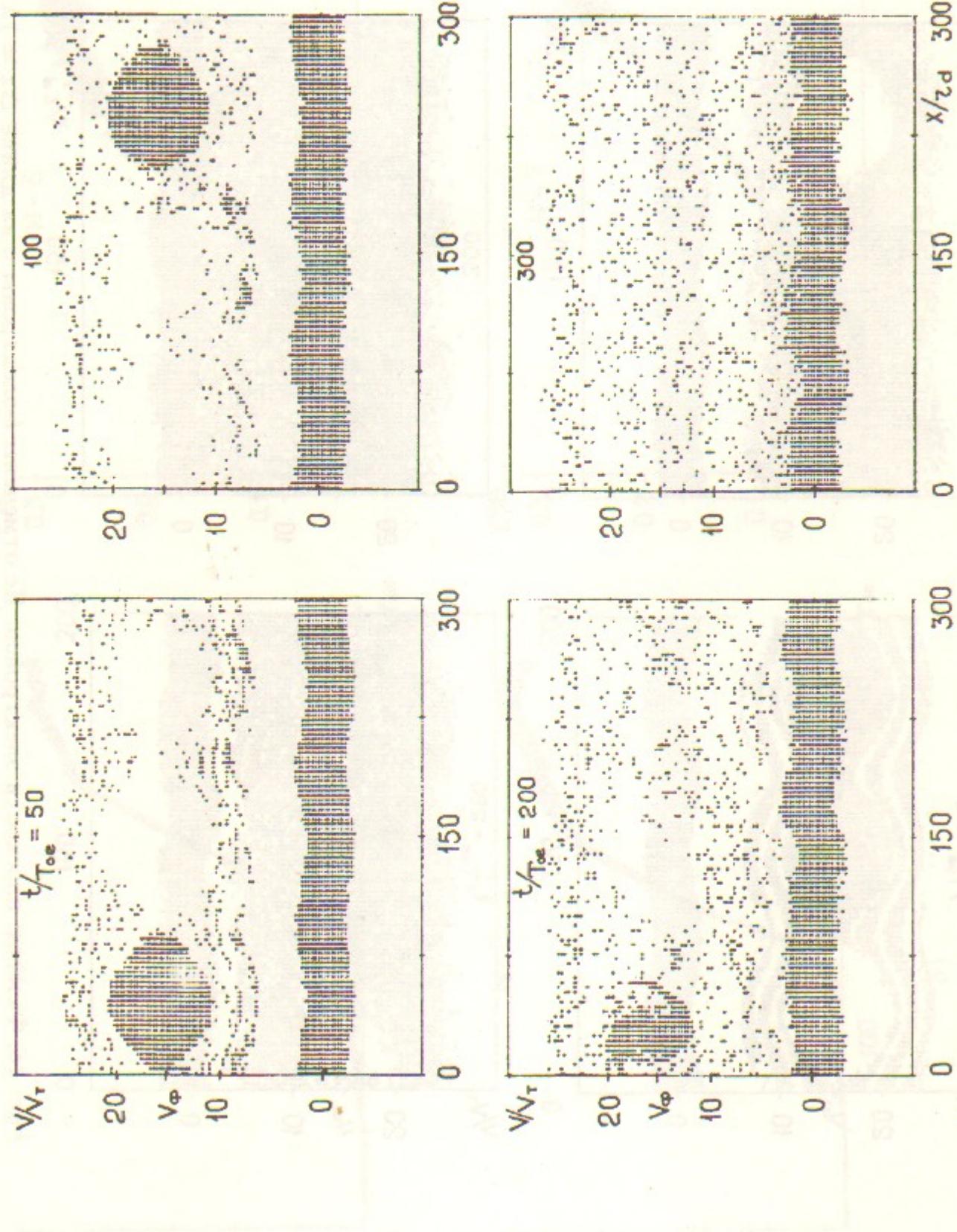


Рис. 17. Фазовые плоскости электронов. Не отмечены b -электроны с на длине $\Delta x = 2\lambda^B$. Случай 2.

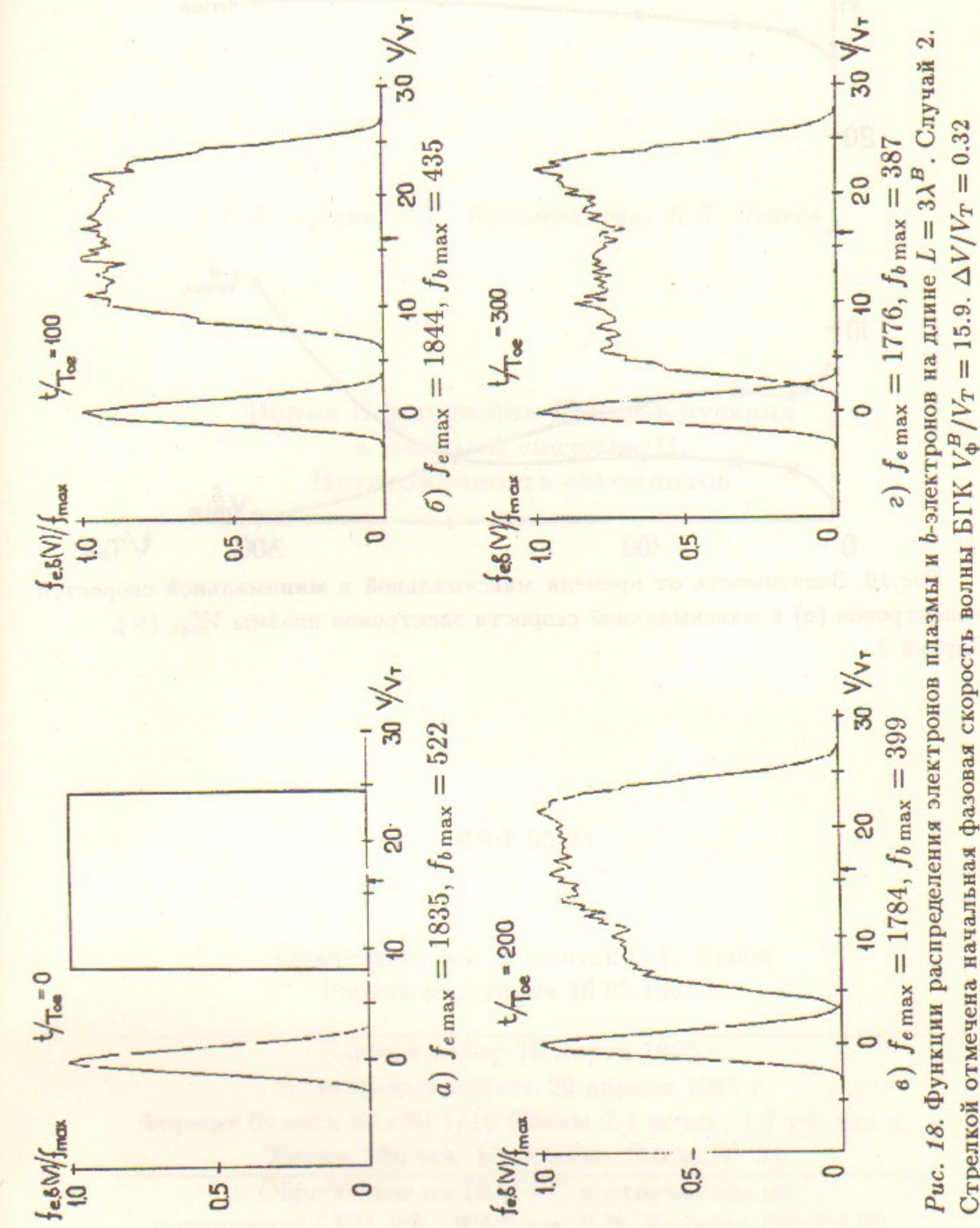


Рис. 18. Функции распределения электронов плазмы и b -электронов на длине $L = 3\lambda^B$. Случай 2.
Стрелкой отмечена начальная фазовая скорость волны БГК $V_\Phi^B/V_T = 15.9$. $\Delta V/V_T = 0.32$

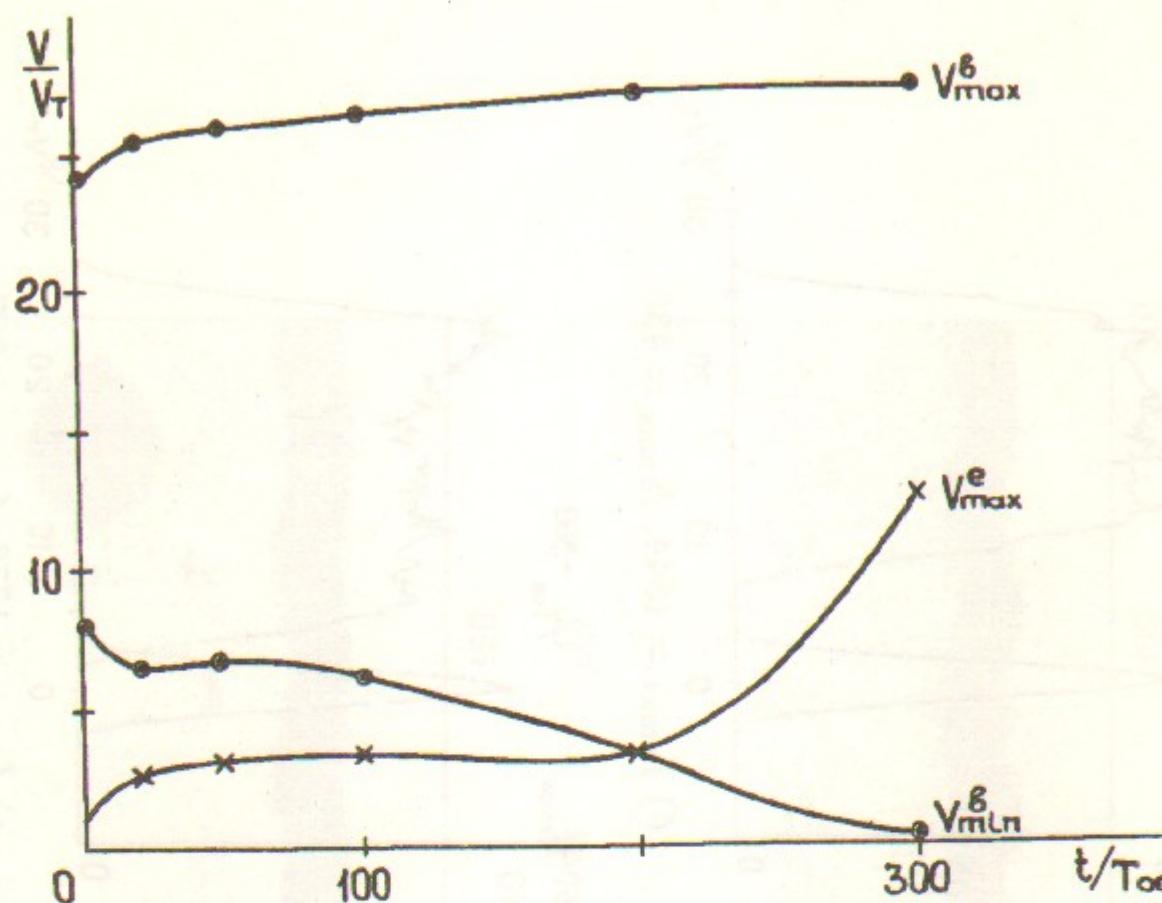


Рис.19. Зависимость от времени максимальной и минимальной скоростей b -электронов (○) и максимальной скорости электронов плазмы V_{max}^e (×).
Случай 2.

Г.А. Артин, Н.С. Бучельникова, Б.Н. Лазеев

Волна Бернштейна-Грина-Крускала
в длинной системе. II.
Неустойчивость сателлитов

ИЯФ 95-24

Ответственный за выпуск С.Г. Попов
Работа поступила 16.03.1995 г.

Сдано в набор 16 марта 1995 г.
Подписано в печать 20 апреля 1995 г.
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 2.1 печ.л., 1.7 уч.-изд.л.
Тираж 250 экз. Бесплатно. Заказ № 24

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