

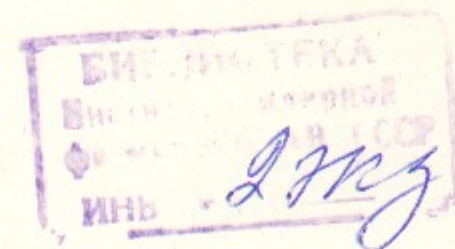


Государственный научный центр
Российской Федерации

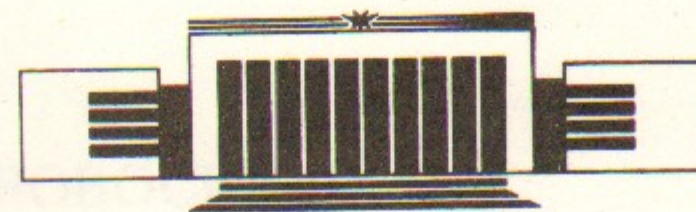
А. 86 Институт ядерной физики
им. Г.И. Будкера

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

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



ИЯФ 95-24



НОВОСИБИРСК

N 1 V

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

Г.А. Артин, Н.С. Бучельникова, Б.Н. 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 $t/T_{oe} \sim 300 - 500$, $\omega_{oe}t \sim 2000 - 3000$) спутниковой 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 ($V_\phi^B/V_T = 15.1$, $V_z^B/V_T = 5.0$, $V_z = 2\sqrt{\frac{e\varphi}{m}}$) без пролетных электронов, так что функция распределения по скоростям $f_b(V)$ имеет вид размытого пучка; и 2 — волна БГК ($V_\phi^B/V_T = 15.9$; $V_z^B/V_T = 5.3$) с пролетными электронами, так что $f_b(V)$ имеет вид плато с резкими краями.

Показано, что начальная стадия неустойчивости спутников 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 гармоника с фазовыми скоростями в области плато не возбуждается и развитие начинается с возбуждения коротковолновых гармоник с V_ϕ^N в районе края $f_b(V)$.

Развитие неустойчивости спутников приводит к развитию сильной стохастической неустойчивости движения электронов в районе областей захвата волны БГК и гармоник-спутников. В результате этой неустойчивости функция распределения $f_b(V)$ расплывается и начинают возбуждаться новые гармоники-спутники. 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-спутников становятся в среднем постоянными, а на фазовой плоскости образуется квазистационарная структура, включающая всю область стохастического движения.

© ГНЦ РФ «Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН»

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 $t/T_{oe} \sim 300 - 500$, $\omega_{oe}t \sim 2000 - 3000$) 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 спутники). Неустойчивость имеет характер пучковой неустойчивости и приводит к возбуждению спутников с фазовыми скоростями в области положительной производной $f_b(V)$ или вблизи от нее — $V_{\phi}^N < V_{\phi}^B$. Параметры волны БГК и спутников, при которых неустойчивость становится существенной, можно описать параметром $\alpha = \frac{V_{\phi}^B + V_{\phi}^N}{V_{\phi}^B - V_{\phi}^N}$, $V_{\phi} = 2\sqrt{\frac{e\varphi}{m}}$. 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, спутники 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 $t/T_{oe} \sim 300 - 500$, $\omega_{oe}t \sim 2000 - 3000$. 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 спутников 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 спутники с фазовыми скоростями в области

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 $m r_d / e T_{oe}^2$; $V_s = 2\sqrt{\frac{\varepsilon \Phi}{m}}$; 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

$N = L/\lambda^N, \lambda^N, V_\Phi^N$ — 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 спутников было рассмотрено в работе [1] в случае 1–4. Было показано, что при развитии неустойчивости существенную роль играет захват b -электронов гармоникой-спутником 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-спутником $N = 4$. 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 размещении 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).

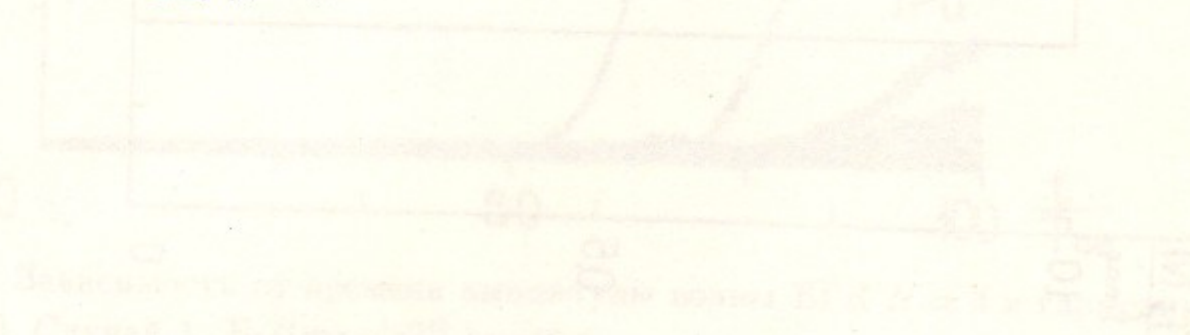
Так же как и в случае 1–4 [1] развитие сильной стохастической неустойчивости сопровождается вторичными нелинейными эффектами.

$N = 1$ 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.



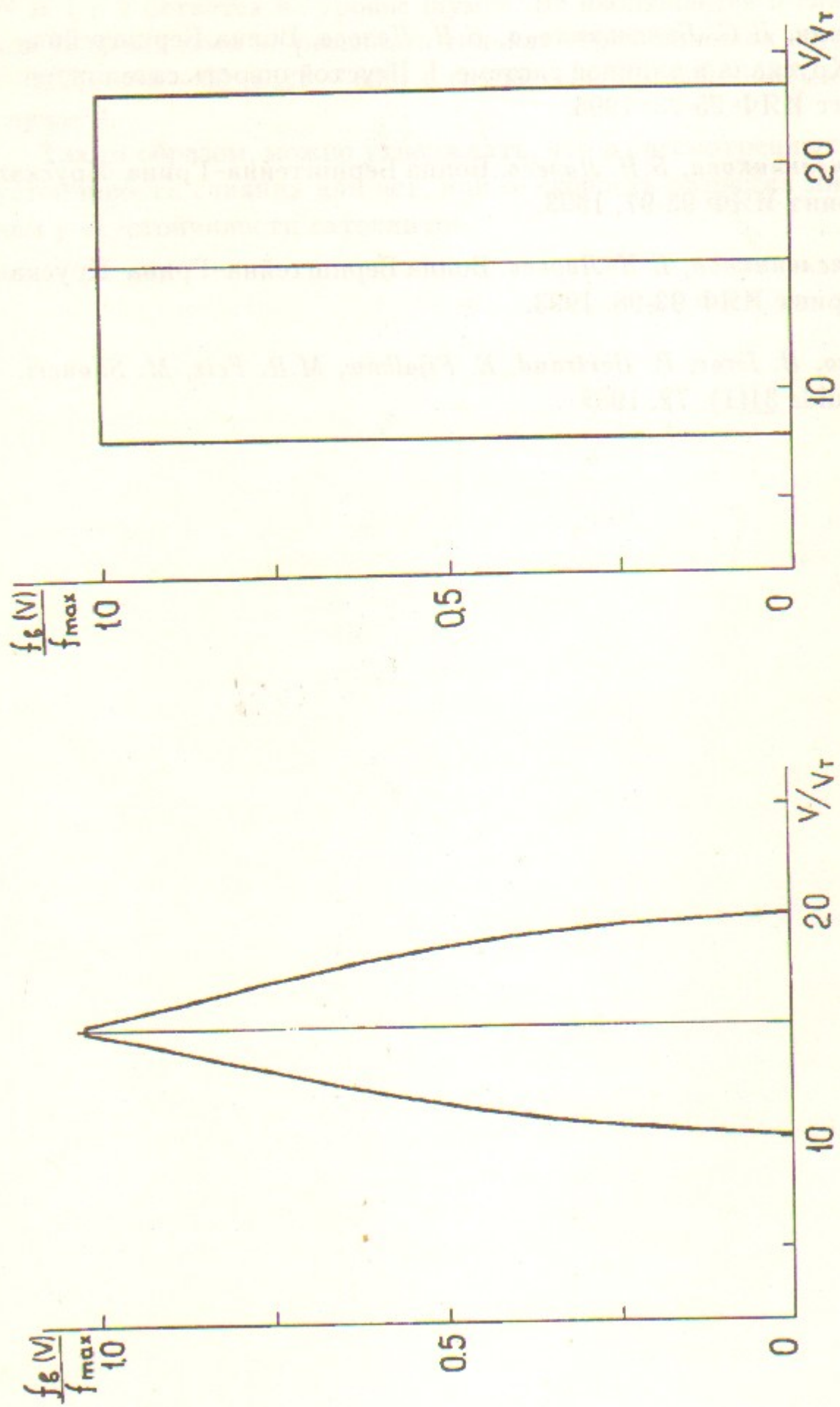


Рис. 1. Начальная функция распределения по скорости b -электронов на длине волны БГК λ^B . а) Случай 1. $V_\Phi^B/V_T = 15.1$; $V_{\min}^B/V_T = 10.1$; $f_{\max} = 329$; $\Delta V/V_T = 0.32$; б) Случай 2. $V_\Phi^B/V_T = 15.9$; $V_{\min}^B/V_T = 7.9$; $f_{\max} = 135$; $\Delta V/V_T = 0.32$.

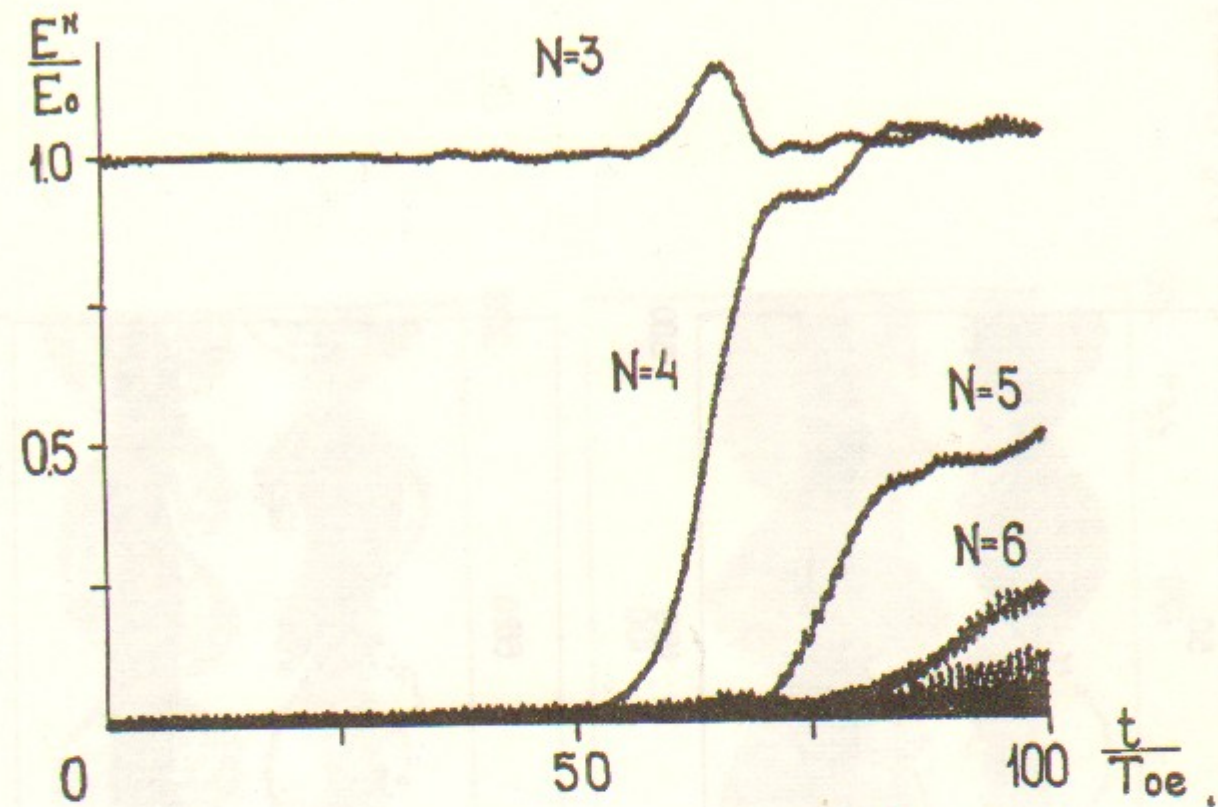


Рис. 2. Зависимость от времени амплитуды волны БГК $N = 3$ и гармоник $N = 1 - 30$. Случай 1. $E_0/(mr_d/eT_{oe}^2) = 15.6$.

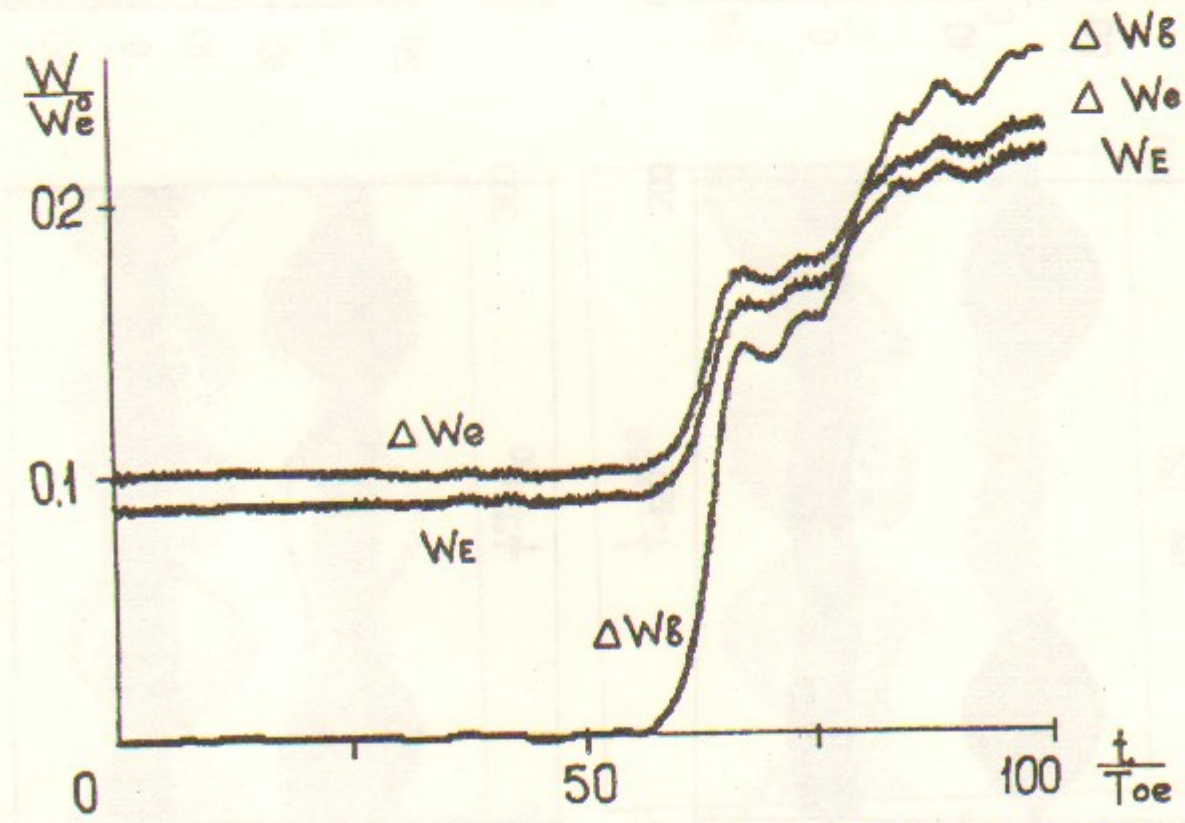


Рис. 3. Зависимость от времени энергии поля W_E , энергии электронов плазмы $\Delta W_e = W_e - W_e^0$ (W_e^0 — тепловая энергия) и потерь энергии b -электронов $\Delta W_b = -(W_b - W_b^0)$. Случай 1.

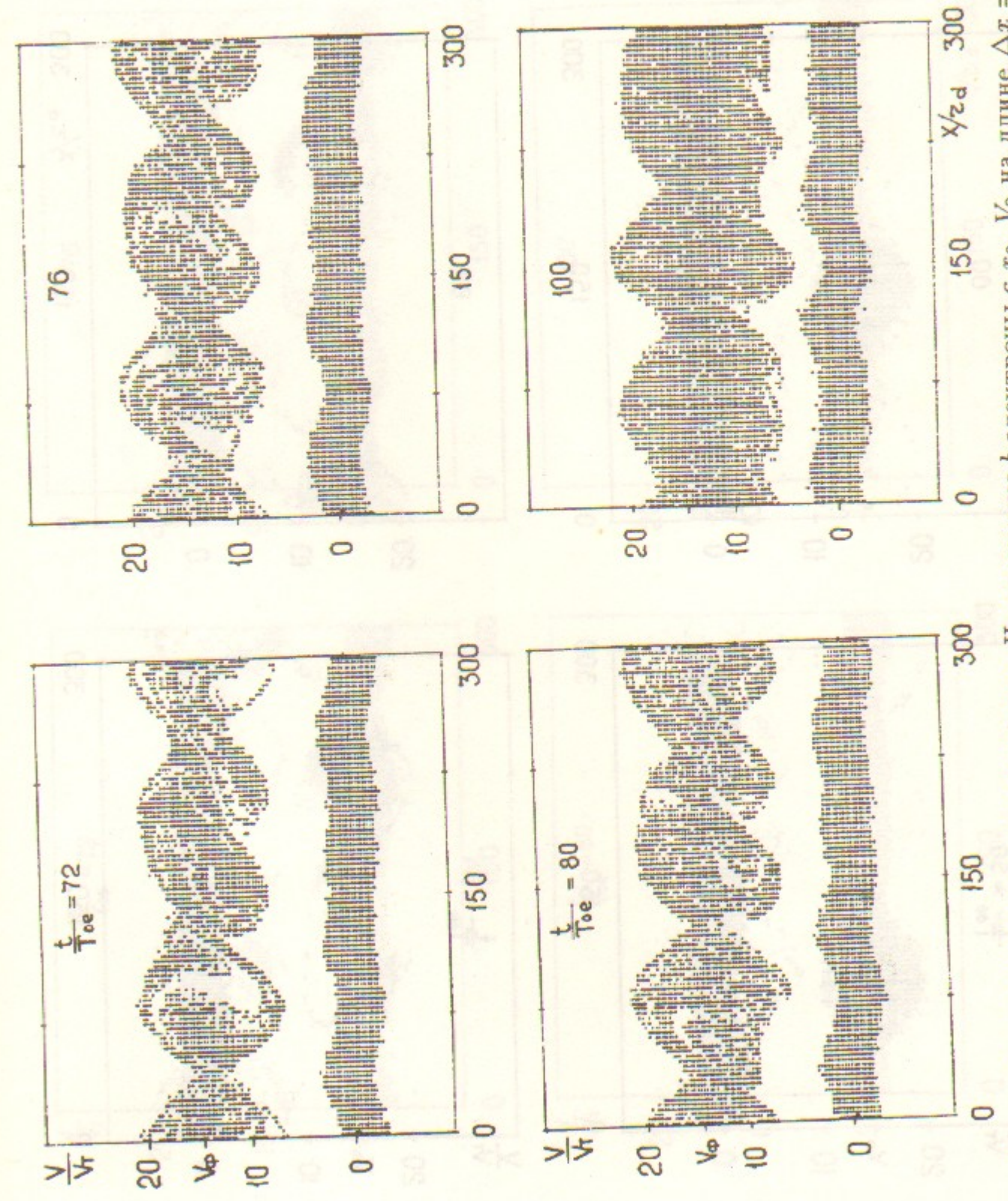
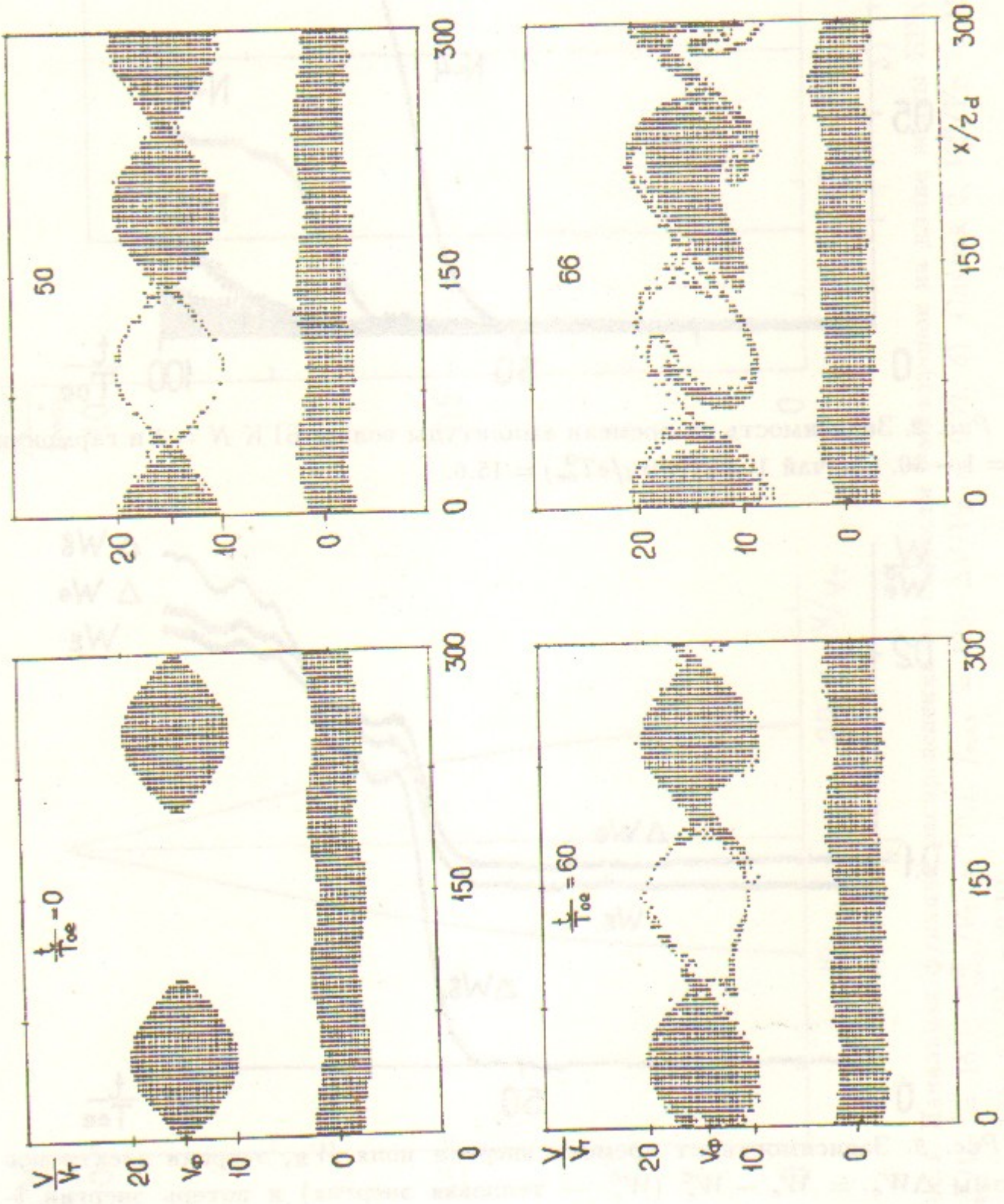


Рис. 4. Фазовые плоскости электронов. Не отмечены b -электроны с x_0, V_0 на длине $\Delta x = 1\lambda^B$. Случай 1.

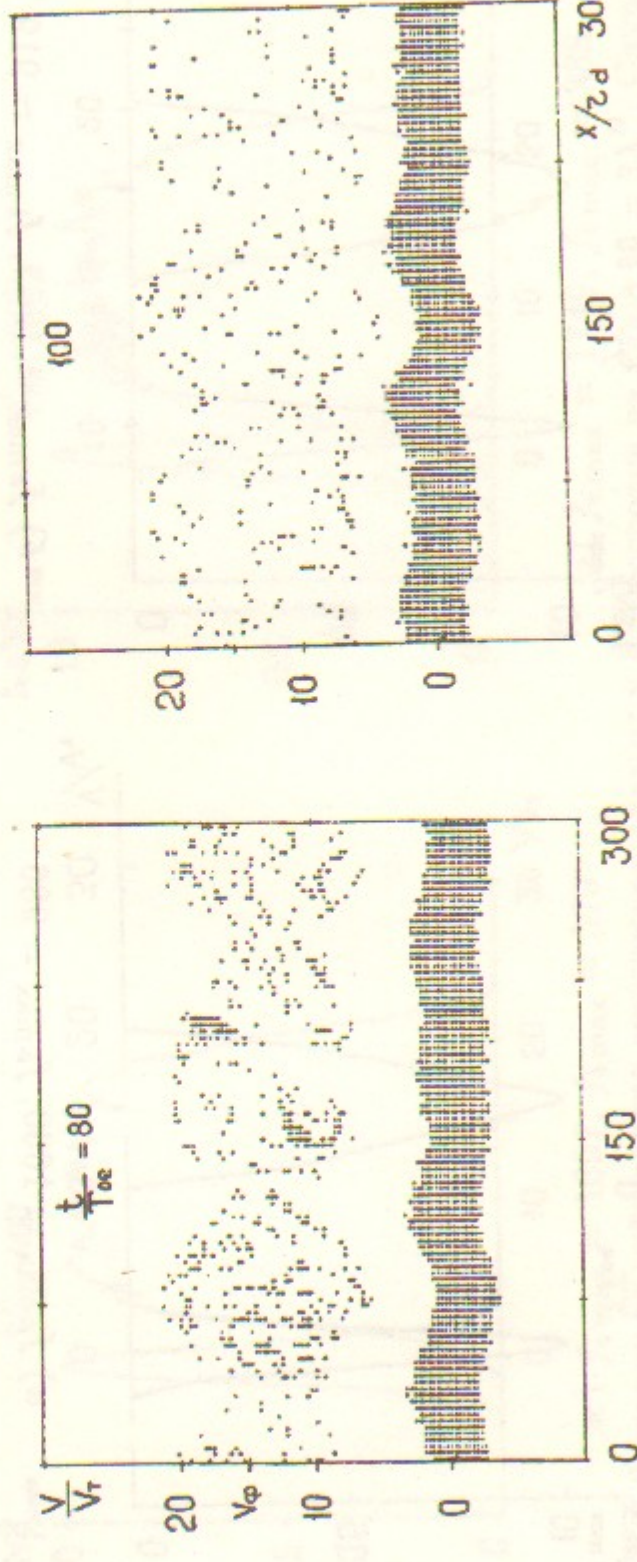
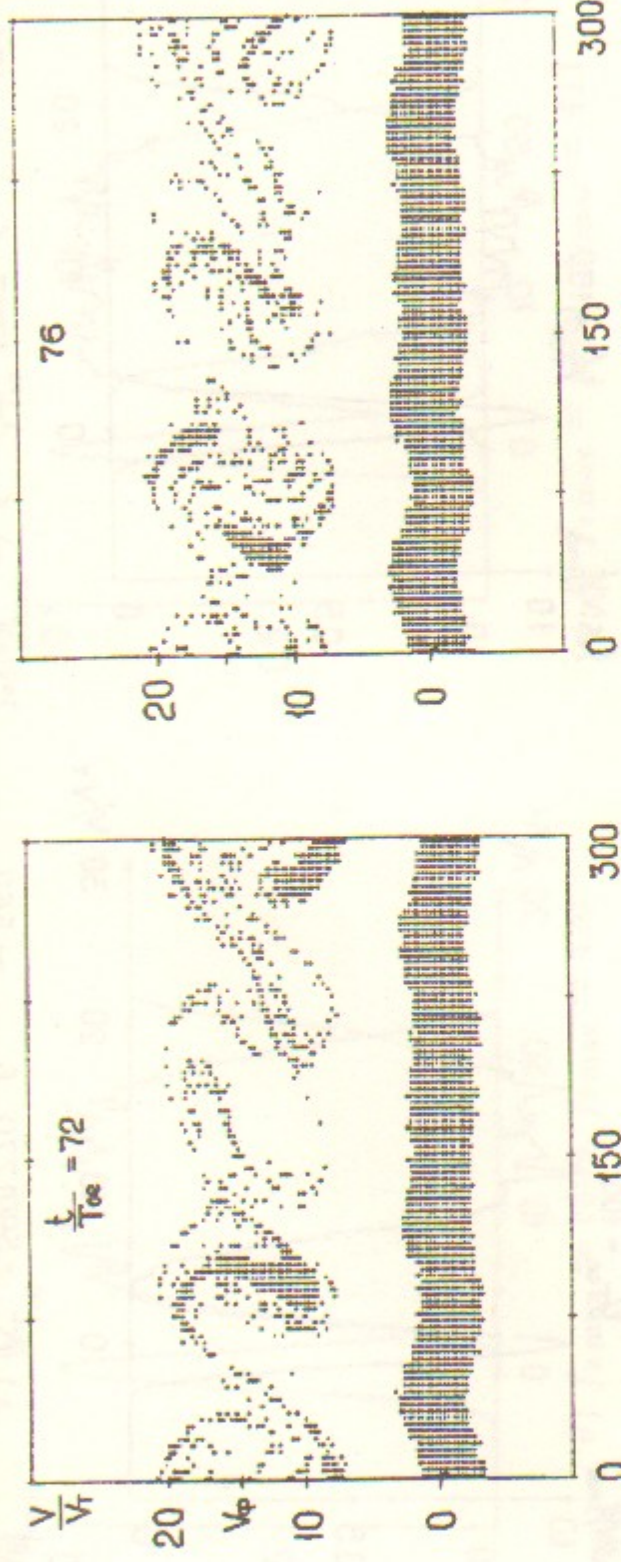
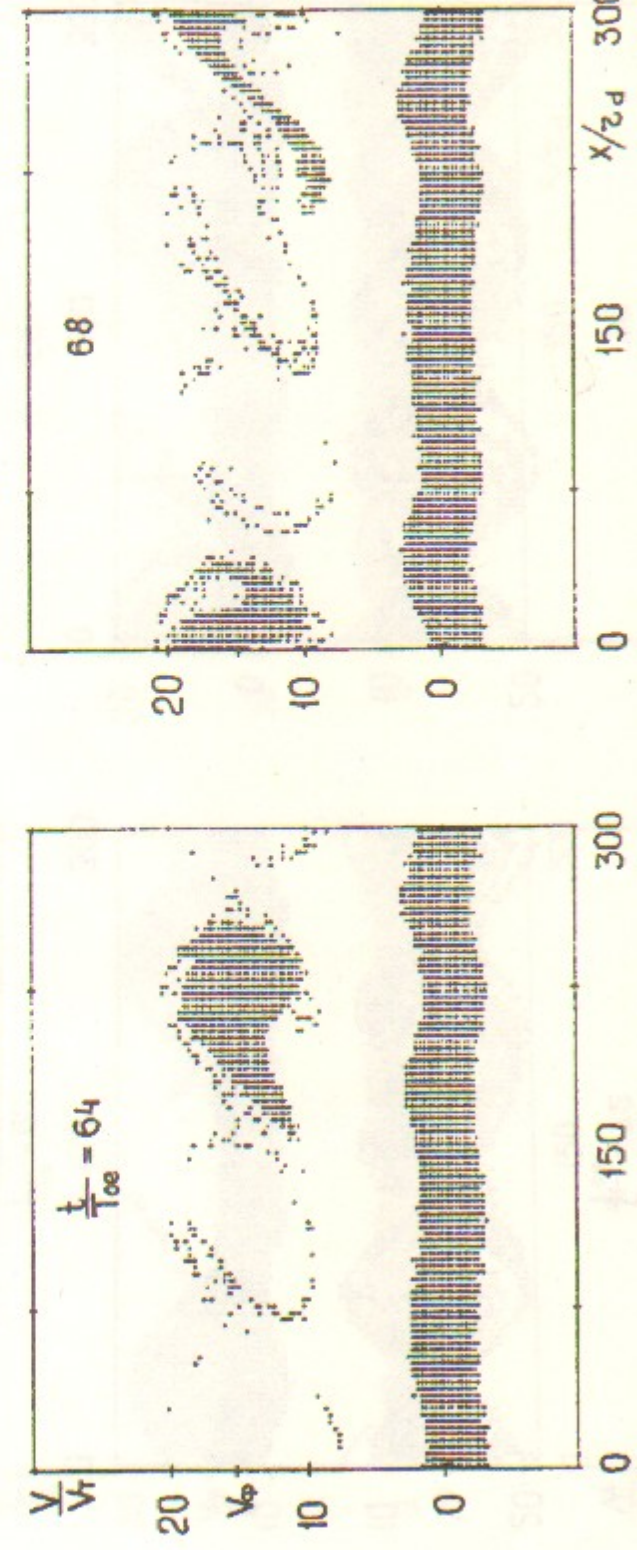
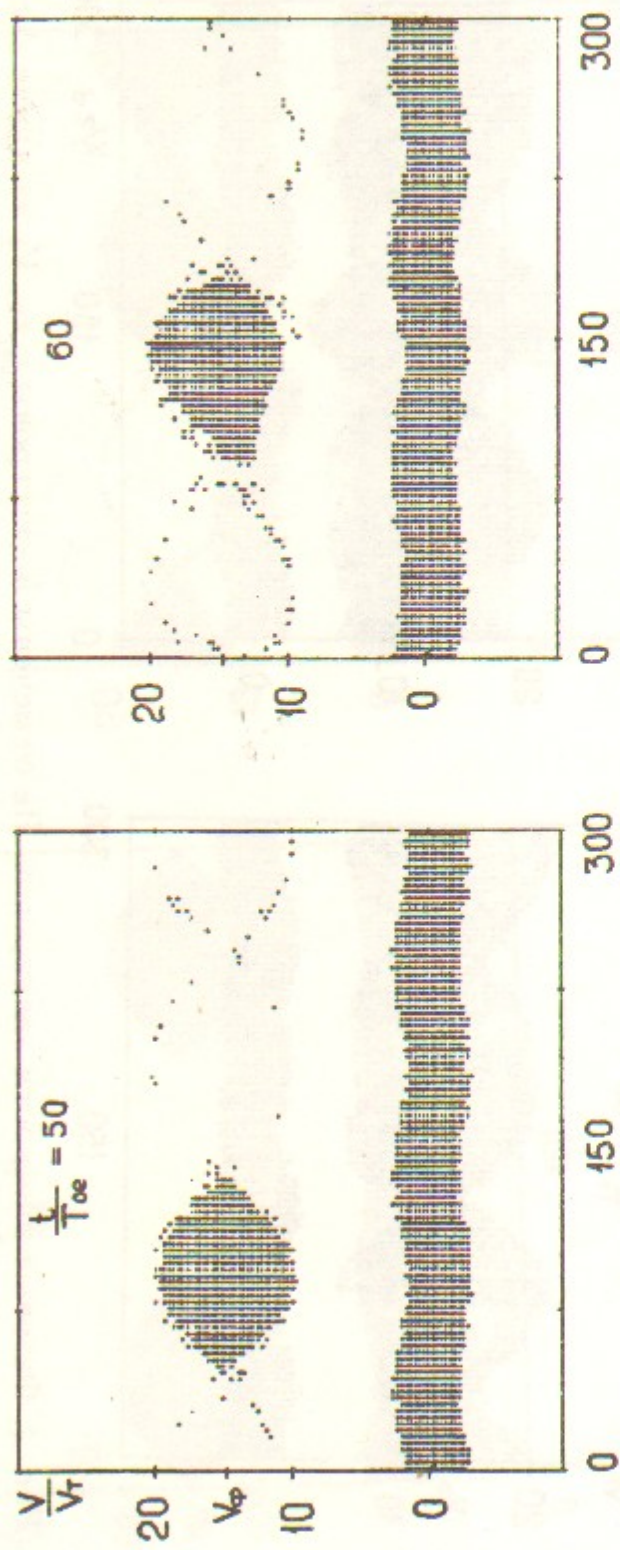
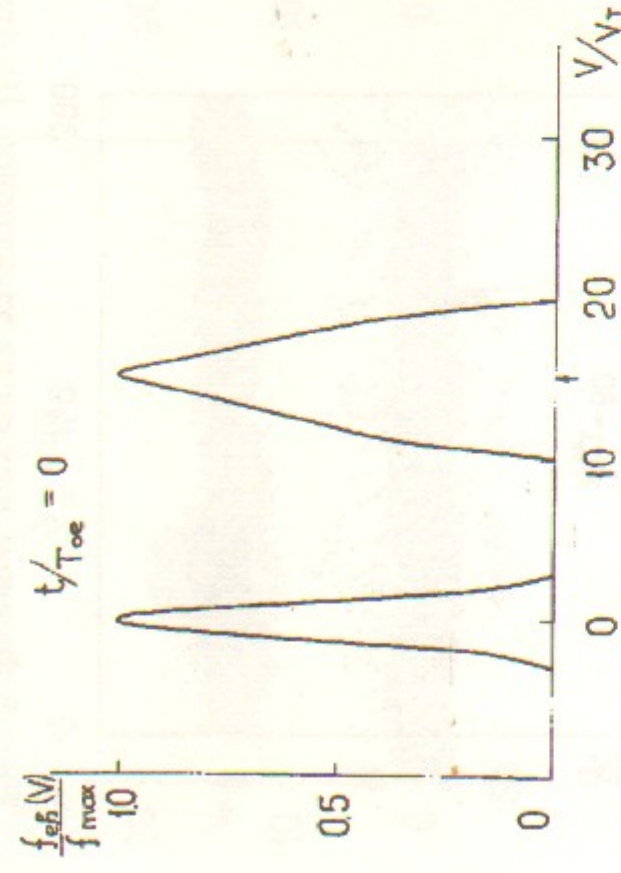
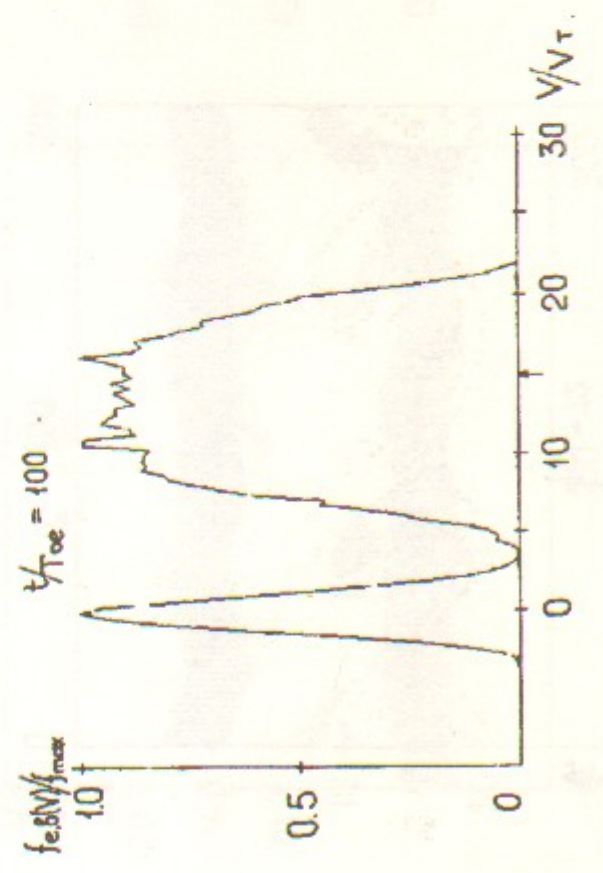


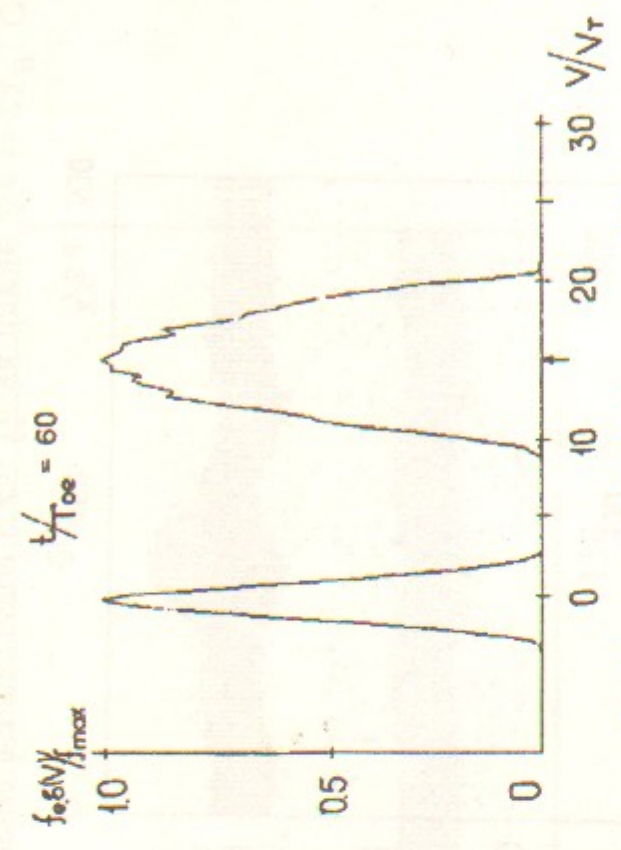
Рис. 5. Фазовые плоскости электронов. Не отмечены *b*-электроны с x_0 , V_0 на длине $\Delta x = 2\lambda^B$. Случай 1.



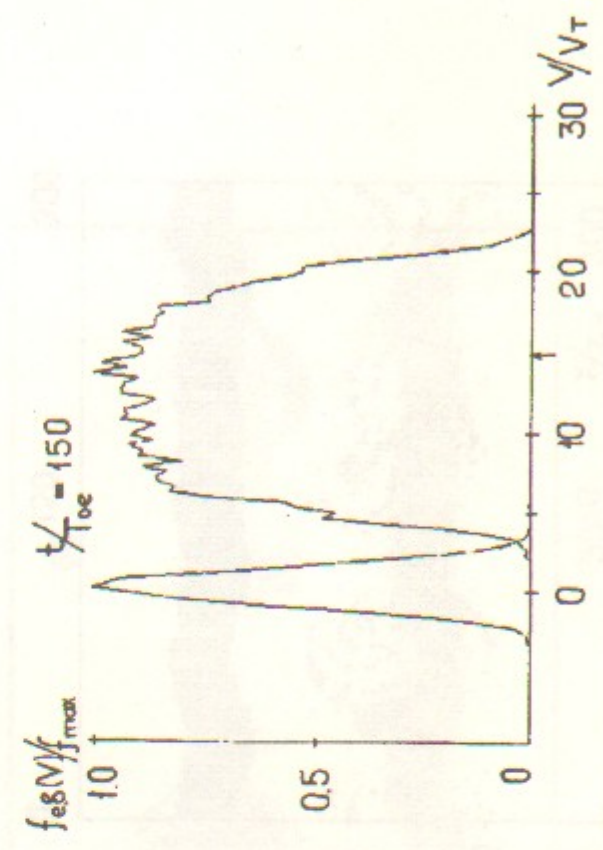
a) $f_{e \max} = 1630, f_{b \max} = 986$



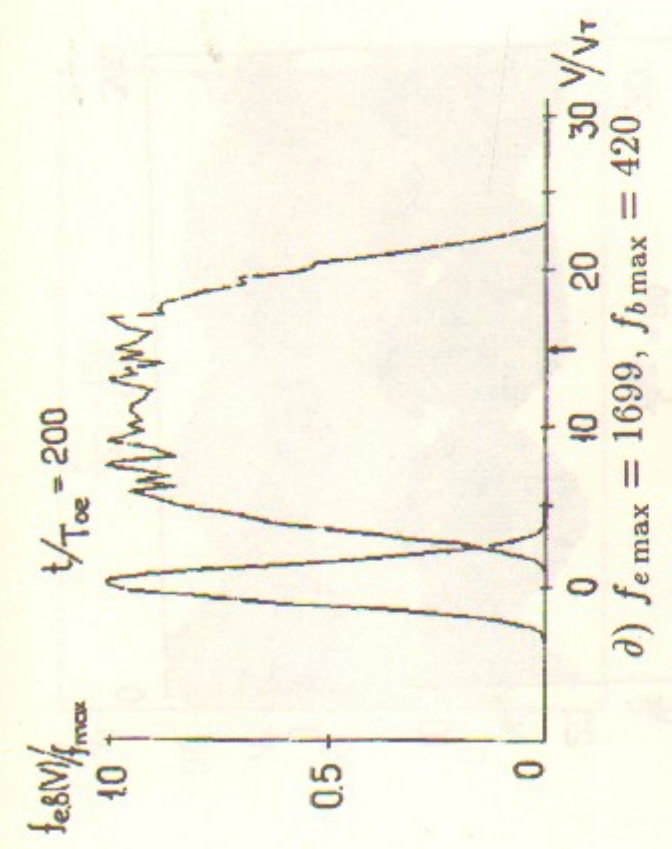
б) $f_{e \max} = 1770, f_{b \max} = 569$



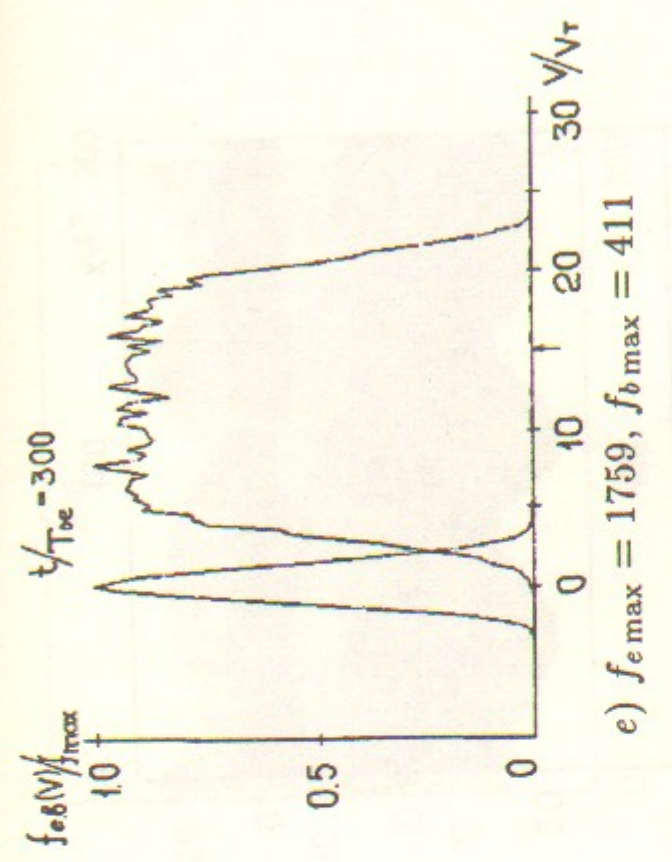
в) $f_{e \max} = 1863, f_{b \max} = 919$



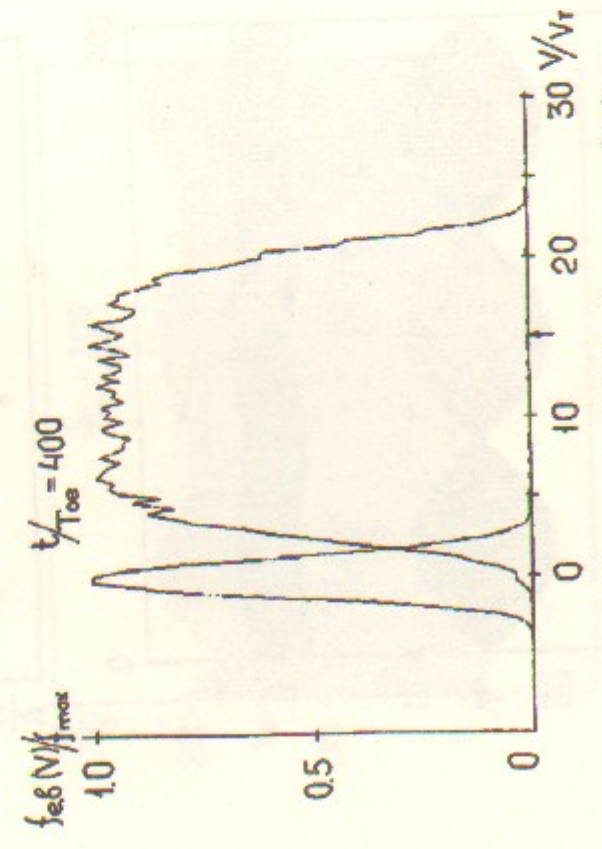
г) $f_{e \max} = 1727, f_{b \max} = 476$



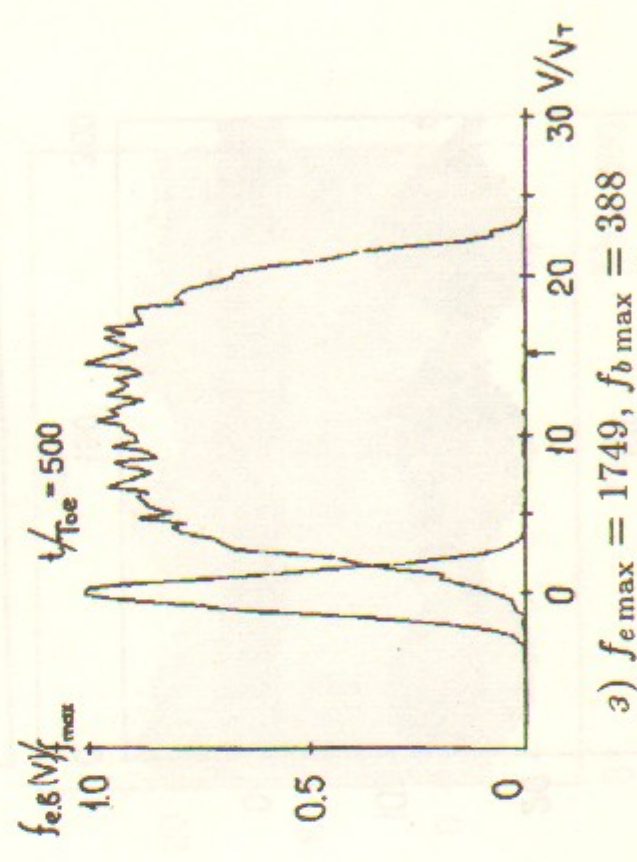
д) $f_{e \max} = 1699, f_{b \max} = 420$



е) $f_{e \max} = 1759, f_{b \max} = 411$



ж) $f_{e \max} = 1697, f_{b \max} = 379$



з) $f_{e \max} = 1749, f_{b \max} = 388$

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

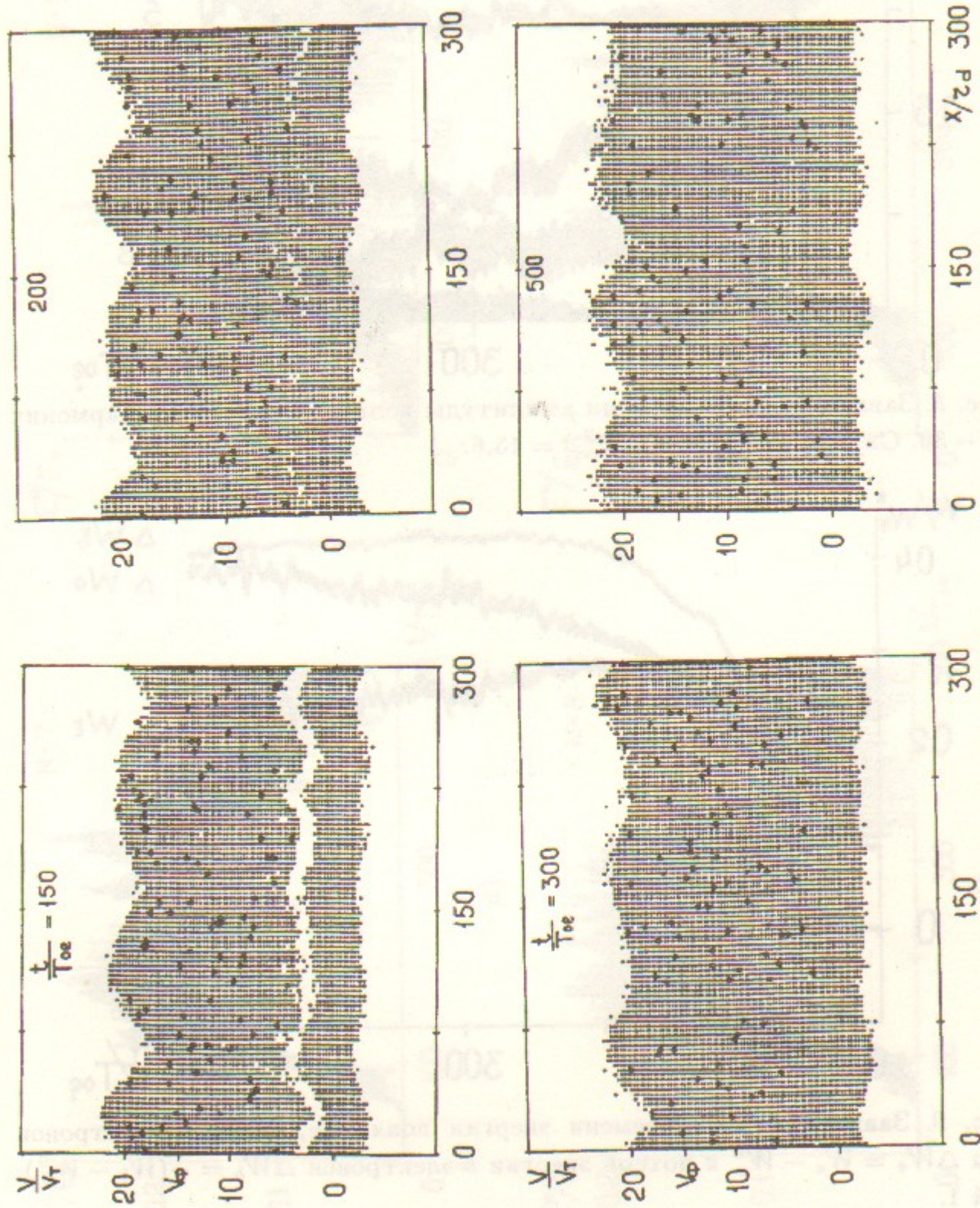
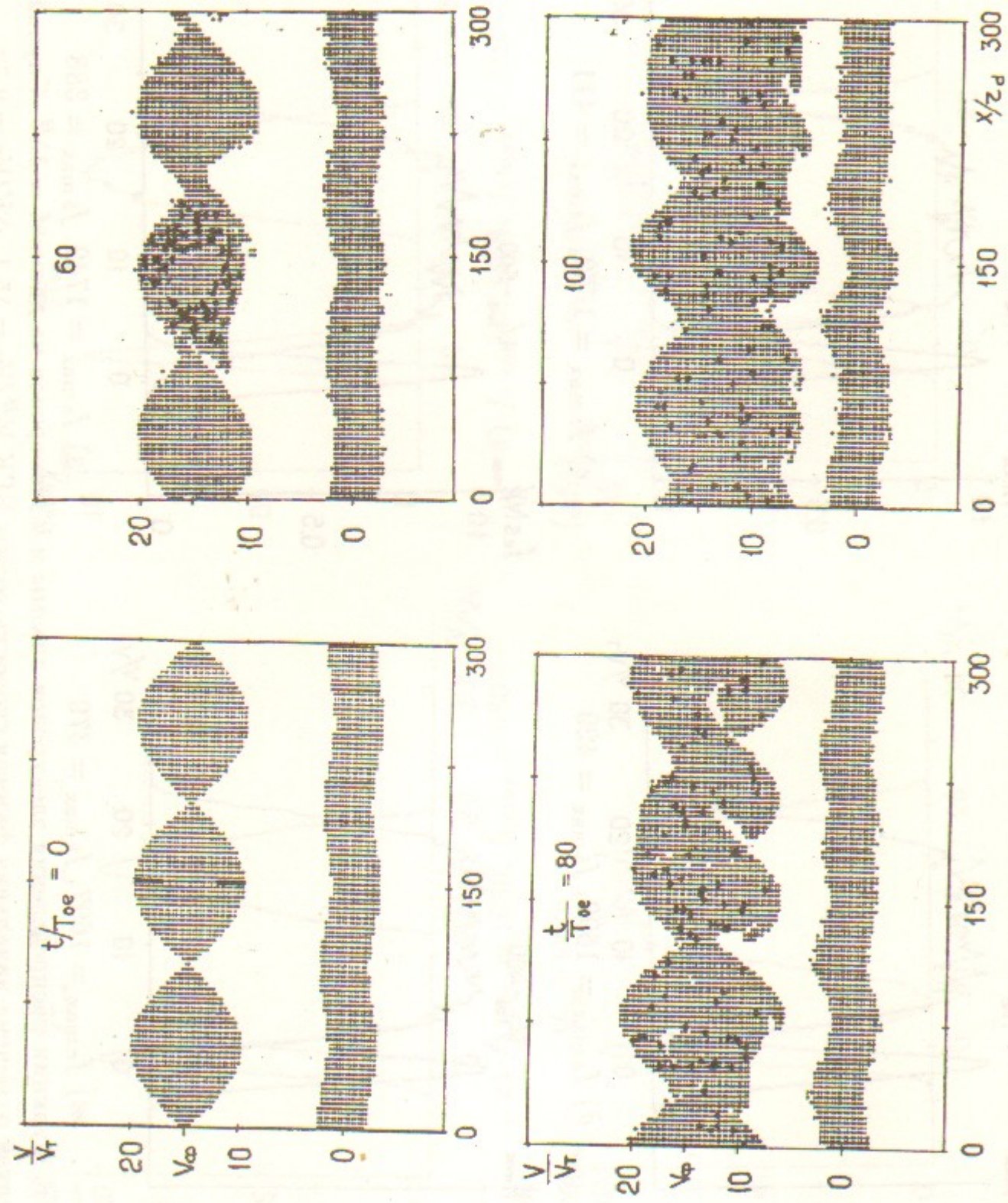


Рис. 7. Фазовые плоскости электронов. Случай 1.

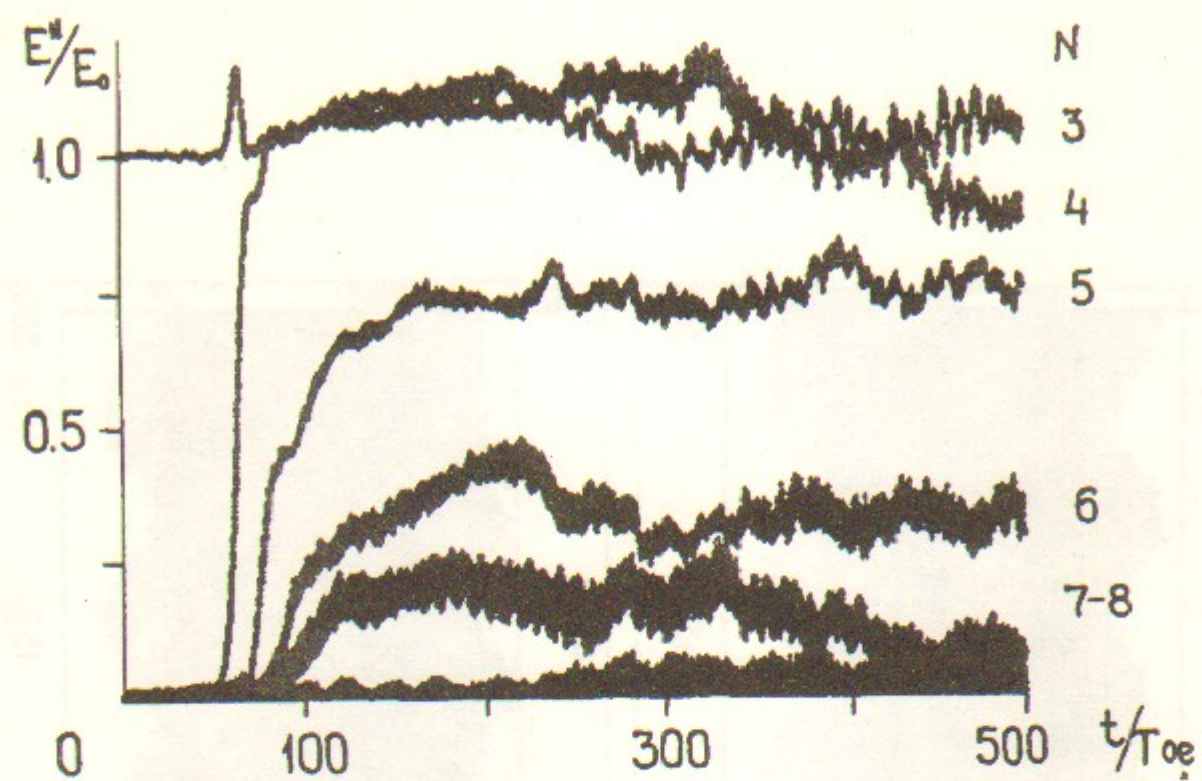


Рис. 8. Зависимость от времени амплитуды волны БГК $N = 3$ и гармоник $N = 1 - 30$. Случай 1. $E_0/(m\tau_d/eT_{oe}^2) = 15.6$.

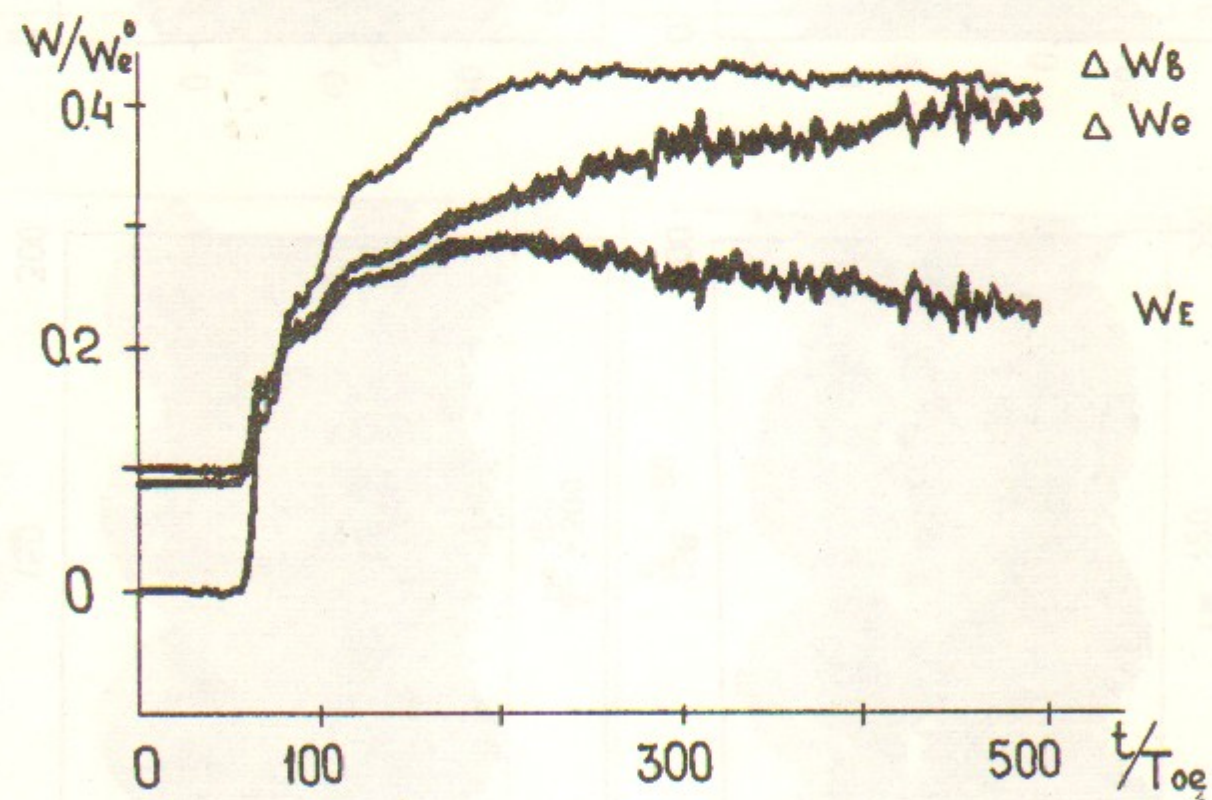


Рис. 9. Зависимость от времени энергии поля W_E , энергии электронов плазмы $\Delta W_e = W_e - W_e^0$ и потерь энергии b -электронов $\Delta W_b = -(W_b - W_b^0)$. Случай 1.

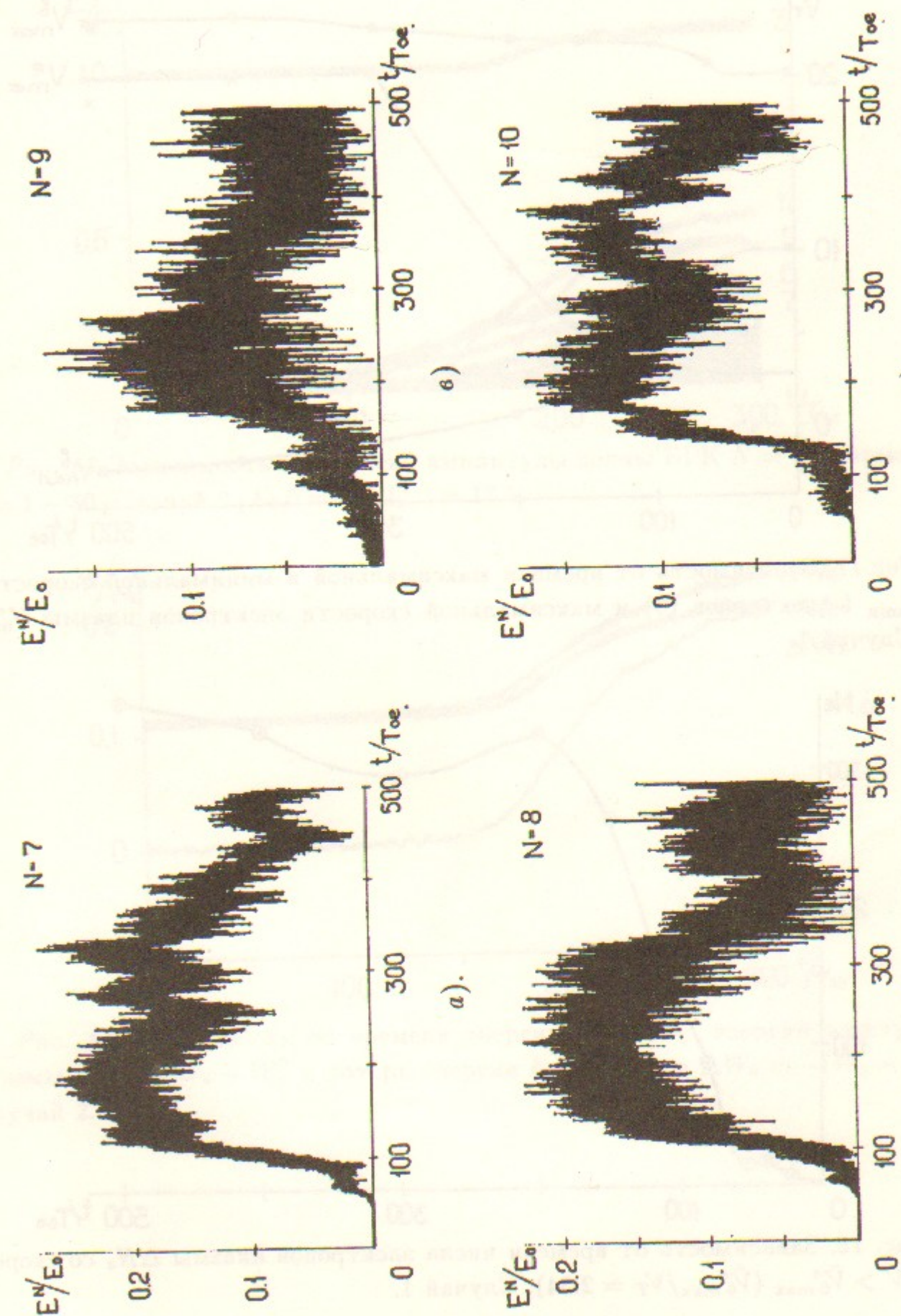


Рис. 10. Зависимость от времени амплитуды гармоник-спутников. Случай 1. $E_0/(m\tau_d/eT_{oe}^2) = 15.6$.

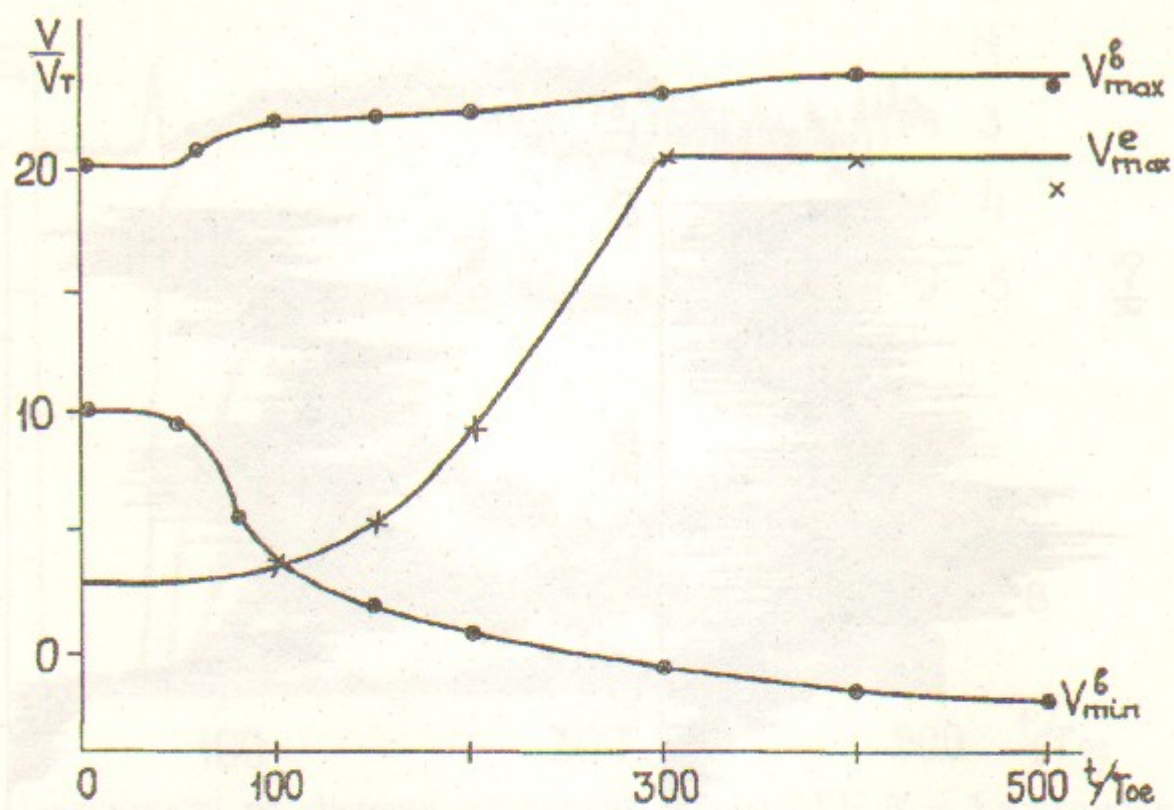


Рис. 11. Зависимость от времени максимальной и минимальной скоростей $V_{\max, \min}^b$ b -электронов (o) и максимальной скорости электронов плазмы V_{\max}^e (x) Случай 1.

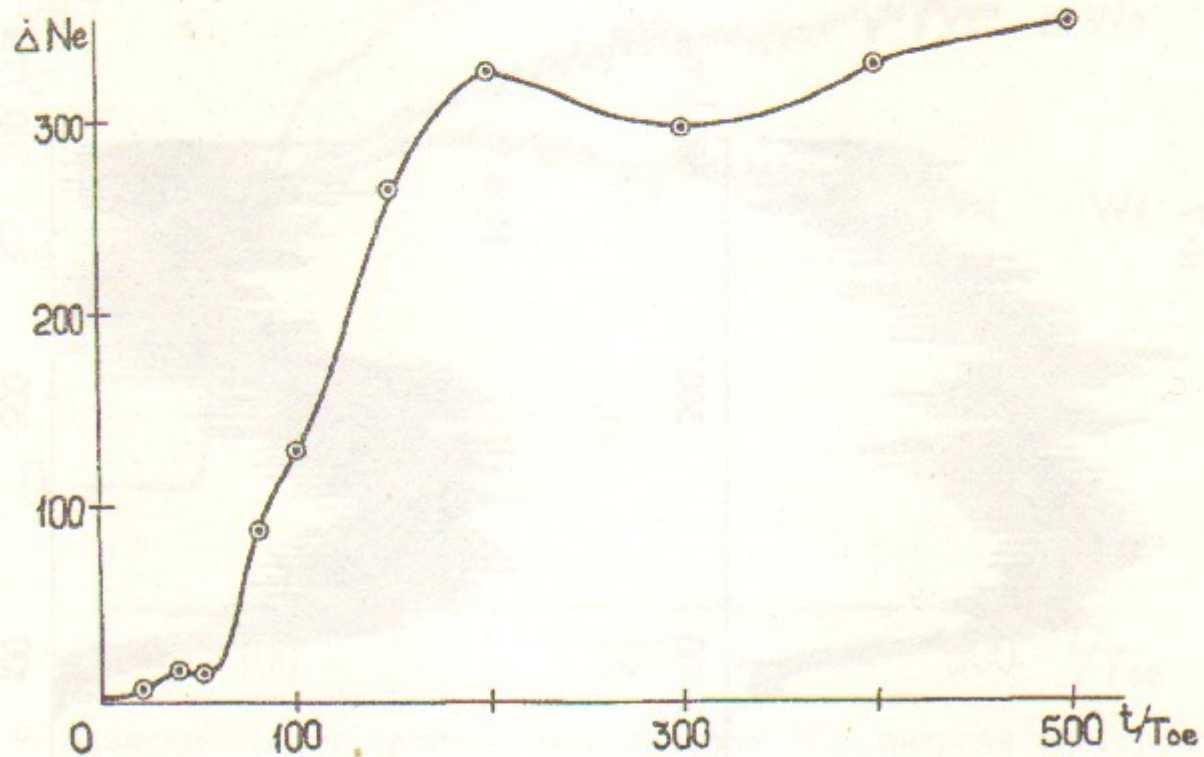


Рис. 12. Зависимость от времени числа электронов плазмы ΔN_e со скоростью $V > \hat{V}_{0\max}^e$ ($\hat{V}_{0\max}^e/V_T = 2.54$). Случай 1.

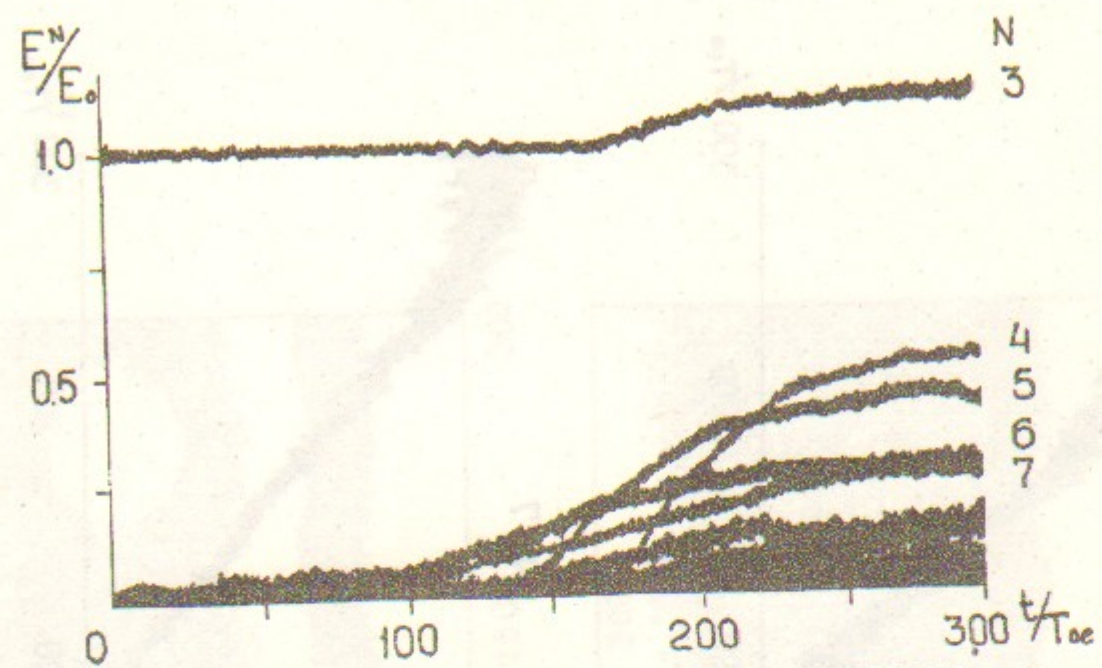


Рис. 13. Зависимость от времени амплитуды волны БГК $N = 3$ и гармоник $N = 1 - 30$. Случай 2. $E_0/(mrd/eT_{oe}^2) = 17.5$.

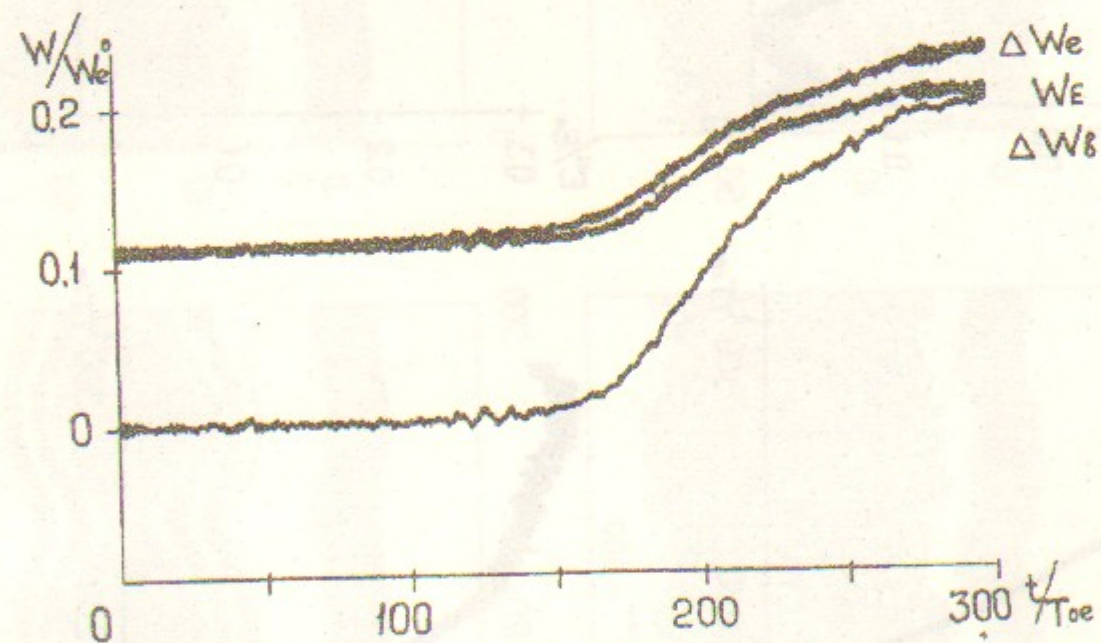


Рис. 14. Зависимость от времени энергии поля W_E , энергии электронов плазмы $\Delta W_e = W_e - W_e^0$ и потерь энергии b -электронов $\Delta W_b = -(W_b - W_b^0)$. Случай 2.

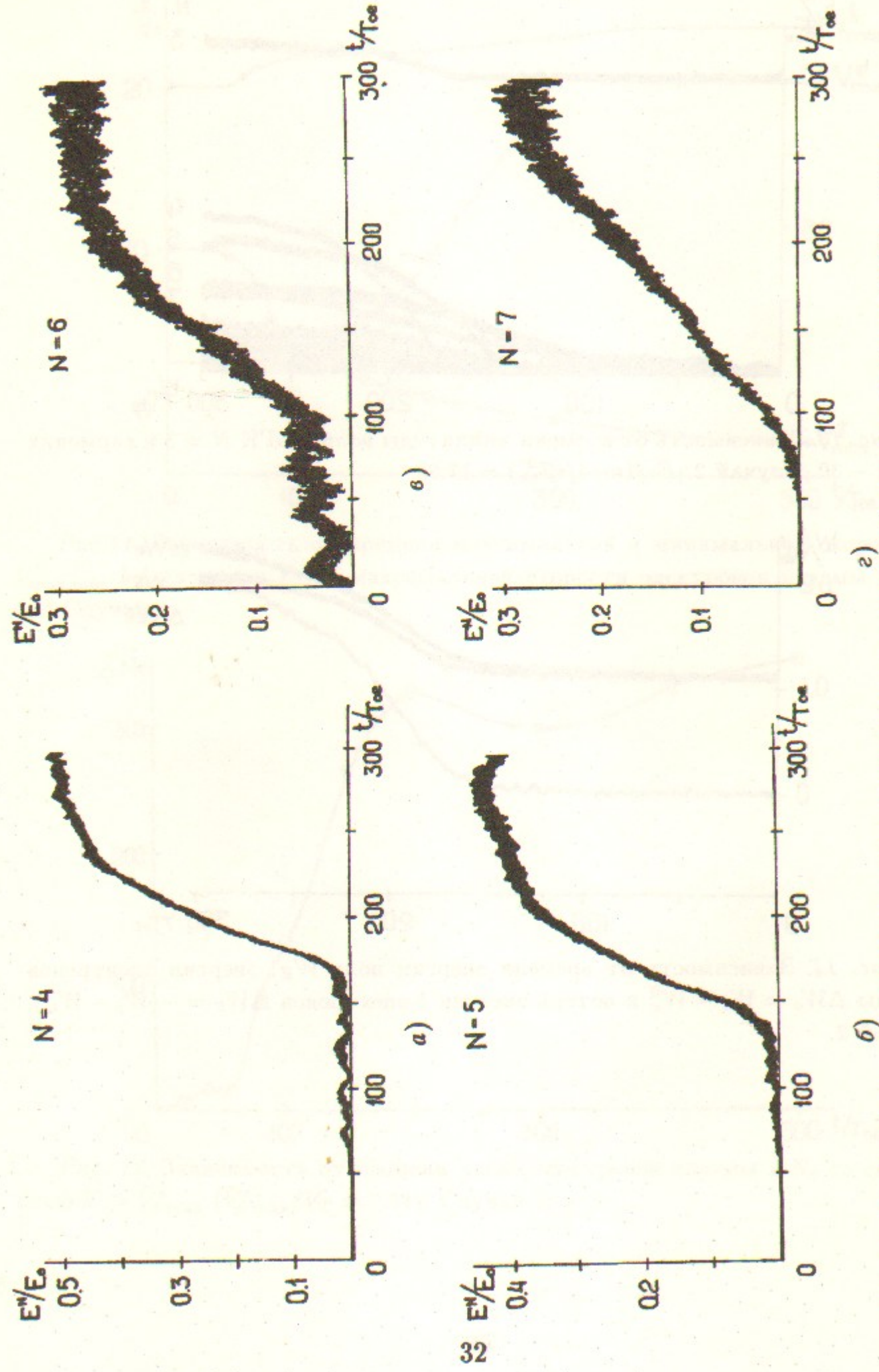


Рис. 15. Зависимость от времени амплитуды гармоник-спутников Случай 1. $E_0/(mg_d/\epsilon T_{0e}^2) = 15.6$.

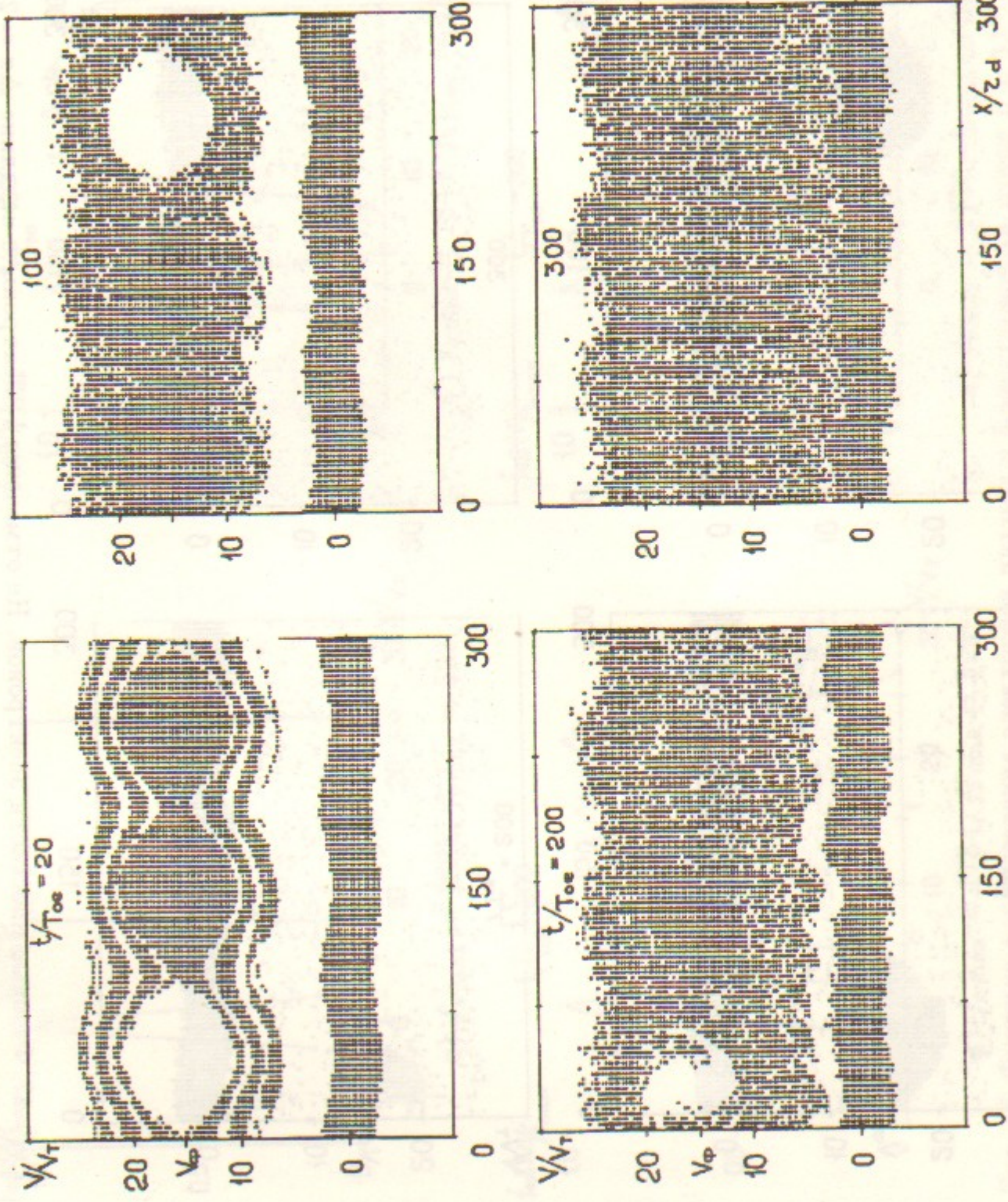


Рис. 16. Фазовые плоскости электронов. Не отмечены b -электроны с на длине $\Delta x = 1\lambda^B$. Случай 2.

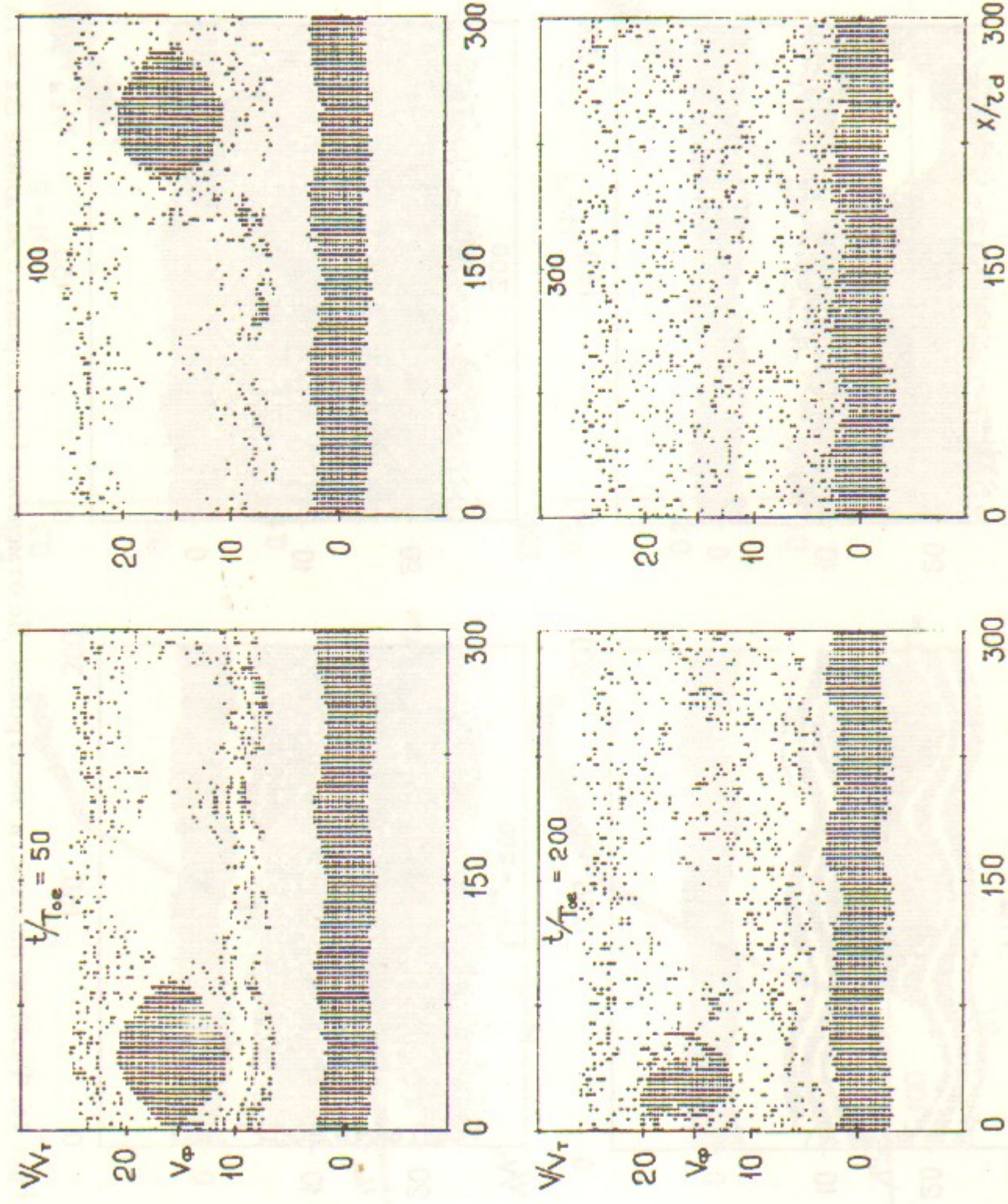


Рис. 17. Фазовые плоскости электронов. Не отмечены b -электроны с на длине $\Delta x = 2\lambda^B$. Случай 2.

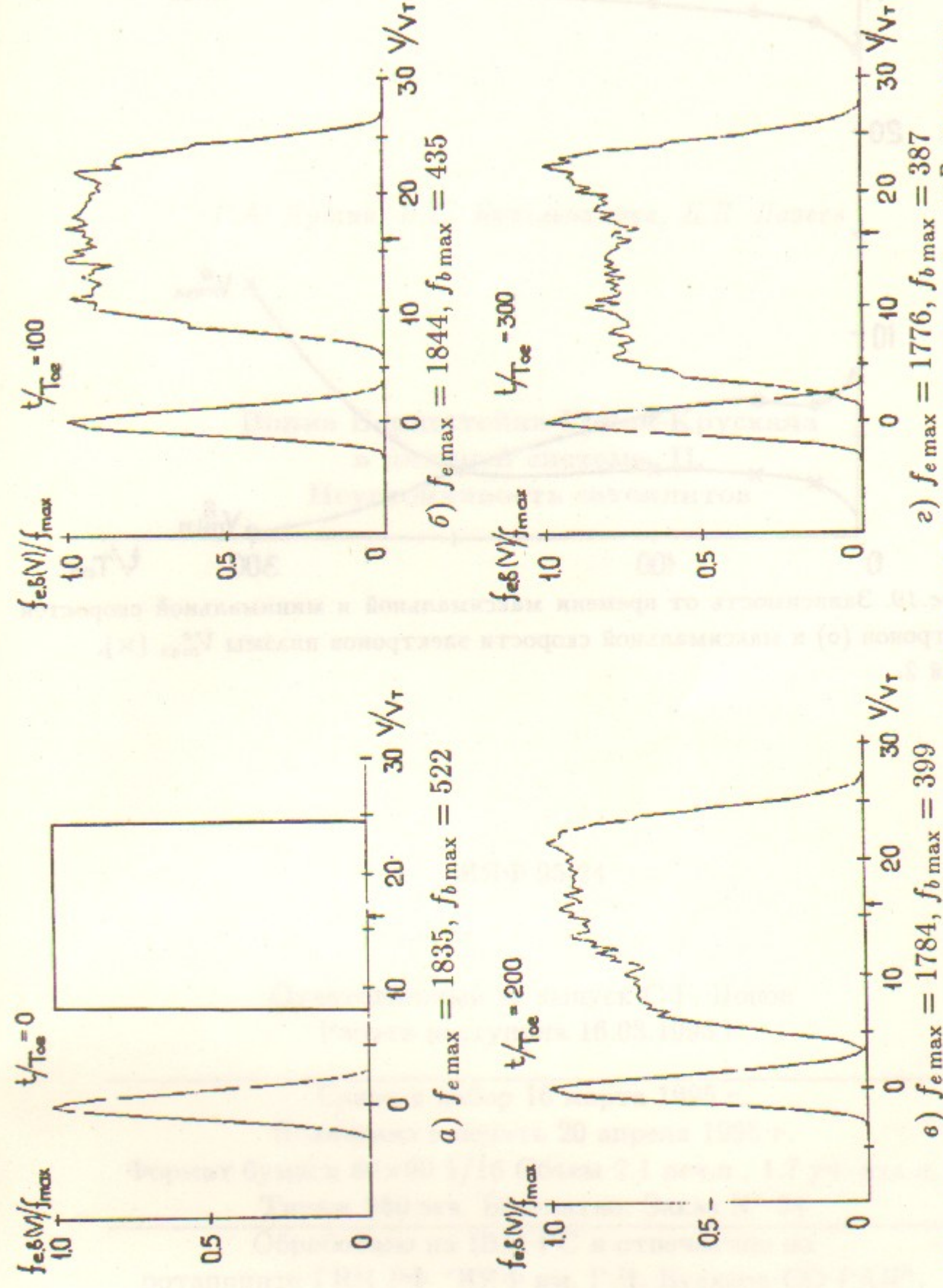


Рис. 18. Функции распределения электронов плазмы и b -электронов на длине $L = 3\lambda^B$. Случай 2. Стрелкой отмечена начальная фазовая скорость волны БГК $V_{\Phi}^B/V_T = 15.9$. $\Delta V/V_T = 0.32$

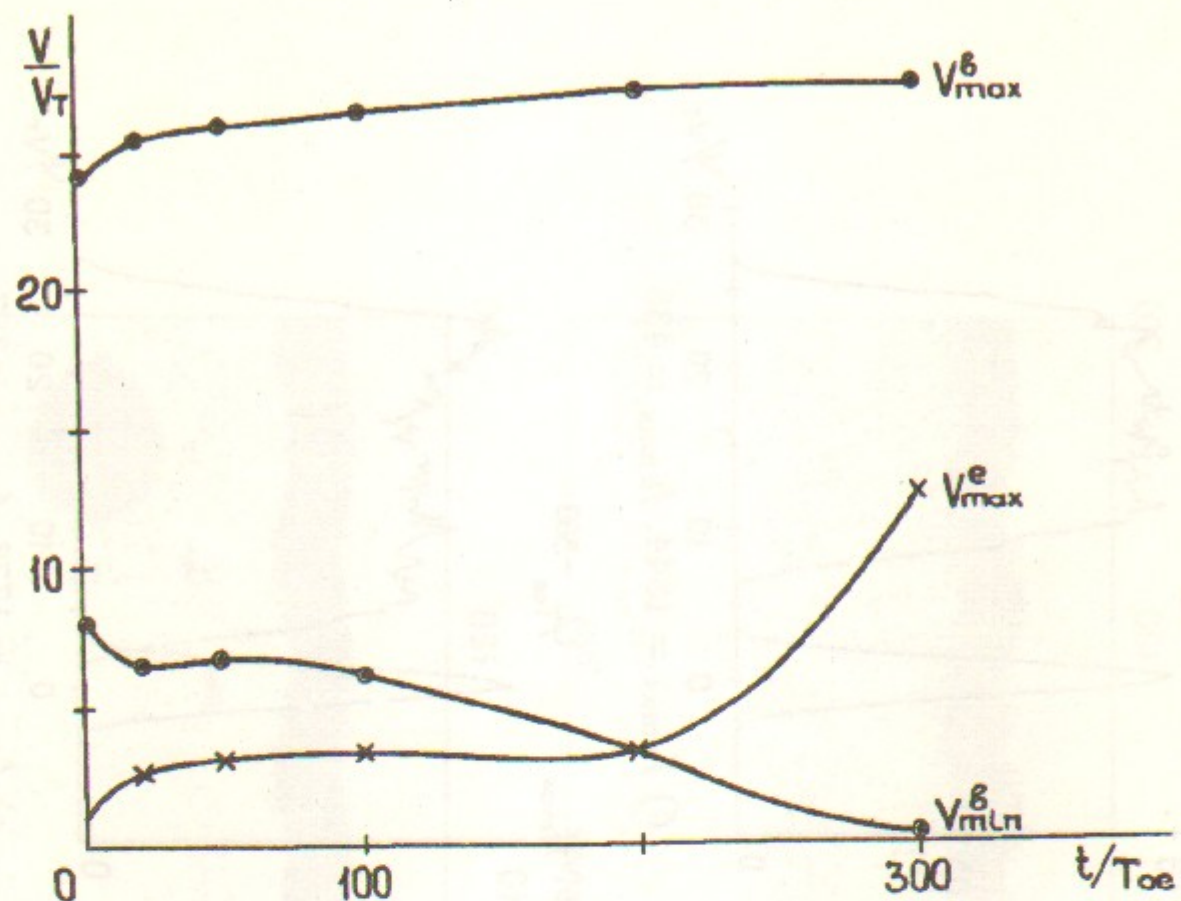


Рис.19. Зависимость от времени максимальной и минимальной скоростей δ -электронов (o) и максимальной скорости электронов плазмы v_{max}^e (x).
Случай 2.

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

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

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.