

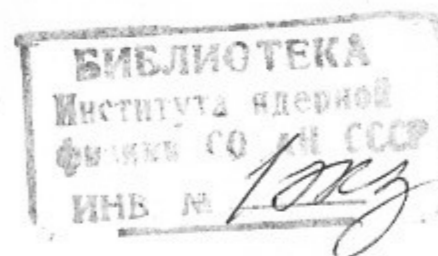


A. 86

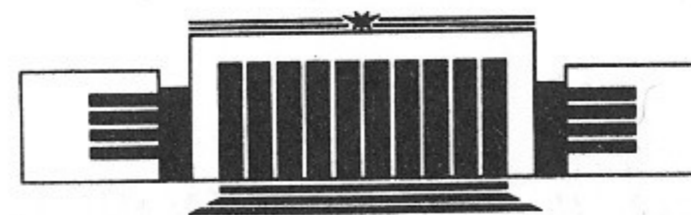
Государственный научный центр  
Российской Федерации  
Институт ядерной физики  
им. Г.И. Будкера

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

ВОЛНА  
БЕРНШТЕЙНА-ГРИНА-КРУСКАЛА  
В ДЛИННОЙ СИСТЕМЕ. III.



ИЯФ 95-25



НОВОСИБИРСК

# The Bernstein–Green–Kruskal Wave in a Long System. III

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 stability of the bunch-type BGK wave in a long system  $L/\lambda^B = 3 - 4$  was studied in numerical experiments (PIC-method). The parameters of the BGK-wave ( $V_{ph}^B/V_T = 15.9$ ;  $V_{tr}^B/V_T = 1.8$   $V_{tr} = 2\sqrt{\frac{e\varphi}{m}}$ ) were chosen to eliminate the possibility of the sideband instability.

It was shown that there is no coalescence of the bunches during a long time — the BGK wave is stable up to  $t/T_{oe} \sim 500$ ,  $\omega_{oe}t \sim 3000$ .

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

В численных экспериментах [1] была исследована волна БГК типа electron hole, которая формируется электронами плазмы при двухпотоковой неустойчивости. В такой волне захваченными электронами заполнена не вся область захвата, а только ее часть — кольцо на фазовой плоскости. В работе [1] было найдено, что в длинной системе  $L/\lambda^B > 1$  такая волна неустойчива относительно слияния в более длинноволновые структуры. В системе  $L = \lambda^B$  волна устойчива. В настоящей работе изучается устойчивость относительно слияния волны БГК типа сгустков, в которой область захвата равномерно заполнена захваченными электронами.

Ранее нами проводились численные эксперименты (метод частиц в ячейках) по исследованию волны БГК типа сгустка в короткой  $L = \lambda^B$  [2, 3] и длинной  $L > \lambda^B$  [4, 5] системе. Было найдено, что волна БГК такого типа неустойчива относительно возбуждения спутников — ленгмюровских волн с номерами гармоник  $N = L/\lambda^N = N^B + 1, N^B + 2, \dots$ , где  $N^B = L/\lambda^B$  — номер гармоники волны БГК [4, 5]. Границу неустойчивости — начальные параметры волны БГК и спутников, при которых инкремент неустойчивости имеет заметную величину — можно описать параметром  $\alpha = (V_s^B + V_s^N)/(V_\phi^B - V_\phi^N)$ ,  $V_s = 2\sqrt{\frac{e\varphi}{m}}$ . Инкремент неустойчивости имеет величину  $\gamma/\omega_{oe} > 1 \cdot 10^{-3}$ , если  $\alpha > 0.8$ .

Для изучения неустойчивости слияния надо исключить неустойчивость спутников. Этого можно достичь, задавая в системе с нужным  $L/\lambda^B$  волну БГК достаточно малой амплитуды, такой, чтобы параметр  $\alpha$  был достаточно мал —  $\alpha < 0.8$ . В случаях, рассмотренных в настоящей работе, выбраны параметры волны БГК, при которых  $\alpha$  не превышает величины  $\alpha \sim 0.5 - 0.6$ . При этом неустойчивость спутников не проявляется в течение длительного времени до  $t/T_{oe} \sim 500$  ( $\omega_{oe}t \sim 3000$ ).

В работе [1] при исследовании волны БГК типа electron hole было

найденно, что в системе с  $L/\lambda^B = 3$  неустойчивость слияния проявляется за время  $\omega_{oe}t \sim 120$ , в системе  $L/\lambda^B = 4$  — за  $\omega_{oe}t \sim 150$ . В настоящей работе развитие волны БГК типа сгустка рассматривалось в течение более длительного времени: в случаях с начальным возмущением в системе с  $L/\lambda^B = 3$  и 4 в течение  $t/T_{oe} \sim 100$ ,  $\omega_{oe}t \sim 600$ ; в случае без начального возмущения в системе с  $L/\lambda^B = 3$  в течение  $t/T_{oe} \sim 500$ ,  $\omega_{oe}t \sim 3000$ . Во всех случаях в течение указанного времени никаких признаков неустойчивости слияния не проявляется. Таким образом, можно утверждать, что волна БГК с областью захвата заполненной электронами устойчива относительно слияния в более длинноволновые структуры.

Численный эксперимент выполняется методом частиц в ячейках. Рассматривается одномерная система длиной  $L$  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 на фазовой плоскости равномерно заполняется электронами. Для более равномерного заполнения используется метод "взвешивания". "Взвешивание" эквивалентно тому, что один электрон дробится на  $\beta$  частиц с массой  $m/\beta$  и зарядом  $e/\beta$ , но с тем же отношением  $e/m$ , как у электрона, так что движение этих частиц (назовем их  $b$ -электроны) не отличается от движения электронов. Более подробно метод задания волны БГК описан в работе [2].

Рассматривается три случая. Параметры волны БГК одинаковы во всех случаях и совпадают со случаем 3 в работе [4] (табл. 1).

Разные случаи различаются длиной системы и номером гармоники волны БГК  $N^B = L/\lambda^B$  (табл. 2).

В работах [4, 5] было показано, что волна БГК неустойчива относительно возбуждения сателлитов — ленгмюровских волн с номерами гармоник  $N \geq N^B + 1$ . Неустойчивость не играет существенной роли, если параметр  $\alpha = \frac{V_\phi^B + V_\phi^N}{V_\phi^B - V_\phi^N}$ ,  $V_\phi^B = 2\sqrt{\frac{e\varphi}{m}}$  достаточно мал —  $\alpha < 0.8$ . Параметры волны БГК в настоящей работе выбраны так, чтобы параметр  $\alpha$  был мал. В табл. 2 приведены начальные (шумовые) параметры гармоники с номером  $N = N^B + 1$  и значения параметра  $\alpha$  в случаях 1, 2 и 3. Видно, что  $\alpha = 0.5 - 0.6 < 0.8$ . Для гармоник с  $N > N^B + 1$  значения  $\alpha$  еще меньше.

Таблица 1

Начальные параметры волны БГК в случаях 1, 2 и 3

Случай	$\frac{\lambda^B}{r_d}$	$\frac{V_\phi^B}{V_T}$	$\frac{V_\phi^B + V_\phi^N}{V_T}$	$\frac{V_\phi^B - V_\phi^N}{V_T}$	$\frac{V_{\min}^B}{V_T}$	$N_b^0$	$N_b'$	$n_b^0/n_e$
1, 2 и 3	100	15.868	1.775	14.093	14.093	1	3000	$1 \cdot 10^{-4}$

$\lambda^B$ ,  $V_\phi^B$ ,  $E_0^B$  — длина волны, фазовая скорость, амплитуда волны БГК,  $E$  нормировано на  $m r_d / e T_{oe}$ ;  $V_\phi^N = 2\sqrt{\frac{e\varphi}{m}}$ ;  $V_{\min}^B = V_\phi^B - V_\phi^N$ ;  $N_b^0$ ,  $N_b'$  — число электронов и число "взвешенных"  $b$ -электронов захваченных в волне БГК на длине  $\lambda^B$ ;  $n_b^0$  — средняя плотность электронов на длине  $\lambda^B$ ,  $n_e$  — плотность электронов плазмы.

Таблица 2

Начальные параметры гармоники с номером  $N = N^B + 1$  и начальные значения параметра  $\alpha$ . Случаи 1, 2 и 3

Случай	$L/r_d$	$\lambda^B/r_d$	$N^B$	$\lambda^N/r_d$	$N$	$\frac{V_\phi^N}{V_T}$	$E_0^N$	$\frac{V_\phi^N}{V_T}$	$\alpha$
1	300	100	3	75	4	12.06	$3.2 \cdot 10^{-7}$	$6.2 \cdot 10^{-4}$	0.47
2	400	100	4	80	5	12.84	$3.4 \cdot 10^{-7}$	$6.7 \cdot 10^{-4}$	0.59
3	300	100	3	75	4	12.06	$1.2 \cdot 10^{-10}$	$1.2 \cdot 10^{-5}$	0.47

$N^B = L/\lambda^B$  — номер гармоники волны БГК;  $\lambda^N$ ,  $N$ ,  $V_\phi^N$ ,  $E_0^N$  — длина волны, номер гармоники, фазовая скорость, амплитуда гармоники с  $N = N^B + 1$ ;  $\alpha = \frac{V_\phi^B + V_\phi^N}{V_\phi^B - V_\phi^N}$ ;  $V_\phi^N = 2\sqrt{\frac{e\varphi}{m}}$ .

В случаях 1 и 2, помимо основной волны БГК, задаются затравочные ленгмюровские волны с  $N < N^B - N = 1$  и 2 в случае 1,  $N = 1, 2$  и 3 в случае 2, т.е. задается возмущение поля  $E(x)$  с  $\delta x > \lambda^B$ . В случае 3 возмущение на задается, начальная амплитуда гармоник  $N = 1, 2$  определяется уровнем шума. Начальные параметры затравочных и шумовых волн приведены в табл. 3.

Таблица 3

Начальные параметры затравочных и шумовых волн. Случай 1, 2 и 3.

Случай	$L/r_d$	$\lambda^N/r_d$	$N$	$V_\phi^N/V_T$	$E_0^N$	$V_s^N/V_T$	$\frac{V_\phi^N + V_s^N}{V_T}$	$\frac{V_\phi^N - V_s^N}{V_T}$
1	300	300	1	47.78	0.02	0.31	48.09	47.47
		150	2	23.94	0.02	0.22	24.16	23.72
2	400	400	1	63.69	0.02	0.36	64.05	63.33
		200	2	31.88	0.02	0.25	32.13	31.63
		133.3	3	21.29	0.02	0.21	21.50	21.08
3	300	300	1	47.78	$2.5 \cdot 10^{-10}$	$3.5 \cdot 10^{-5}$	47.78	47.78
		150	2	23.94	$2.0 \cdot 10^{-10}$	$2.2 \cdot 10^{-5}$	23.94	23.94

$\lambda^N, V_\phi^N, E_0^N$  — длина волны, фазовая скорость, амплитуда гармоники с номером  $N = L/\lambda^N$ .

Следует отметить, что при работе с волной БГК малой амплитуды существенную опасность представляют шумы. Для снижения начального уровня шумов используется метод "спокойного старта" [6]. Этот метод заключается в том, что максвелловское распределение задается не в среднем по системе, а в каждой ячейке по  $x$  ( $\Delta x = 1r_d$ ). Это позволяет существенно снизить начальный уровень шумов. Из табл. 2, 3 видно, что начальная амплитуда "шумовых" гармоник мала — в случаях 1 и 2  $E_0^N \sim 10^{-7}$ , в случае 3  $E_0^N \sim 10^{-10}$  (здесь и далее  $E$  нормировано на  $mr_d/eT_{oe}^2$ ).

Однако, с течением времени уровень шумов растет. Анализ кривых  $E^N(t)$  в случаях 1, 2, 3 ( $N \sim 1 - 30$ ) показывает, что к  $t/T_{oe} \gtrsim 30$  уровень шумов достигает величины  $E^N \sim 10^{-1}$ , а к  $t/T_{oe} \gtrsim 100$  устанавливается на примерно постоянном уровне, причем средние амплитуды достигают величины  $E^N \sim 0.4 - 0.6$ , а максимальные  $E_{\max}^N \sim 0.6 - 1$ . Таким образом, амплитуда шумовых гармоник становится сравнимой с амплитудой волны БГК  $E_0^B = 1.95 - E_{\max}^N \sim 1/3 - 1/2 E_0^B$ .

Рост шумов может привести к паразитным нефизическим эффектам. Проконтролировать роль этих эффектов можно по сохранению полной

энергии системы. Оказывается, что во всех случаях 1, 2 и 3 полная энергия растет. Однако за время счета максимальное изменение полной энергии не превышает величины  $\Delta W_n/W_n \sim 0.3 - 2\%$ : максимальное значение  $\Delta W_n/W_n$  за  $t/T_{oe} \sim 0 - 100$  в случае 1 —  $\Delta W_n/W_n \sim 2.5 \cdot 10^{-3}$  в случае 2 —  $\Delta W_n/W_n \sim 3.2 \cdot 10^{-3}$  в случае 3 за  $t/T_{oe} \sim 0 - 500$  —  $\Delta W_n/W_n \sim 2 \cdot 10^{-2}$ . Таким образом, во всех случаях паразитный эффект невелик.

Рассмотрим случай 1 с  $L/r_d = 300, \lambda^B/r_d = 100$ . В этом случае в начальный момент времени задается волна БГК  $N^B = 3$  (табл. 1) и затравочные ленгмюровские волны  $N = 1$  и 2 (табл. 3). Развитие волны БГК прослеживается до  $t/T_{oe} = 100$  ( $\omega_{oe}t \sim 600$ ).

Прежде всего нужно убедиться, что неустойчивость спутников не играет существенной роли. Наибольший инкремент нарастания при этой неустойчивости в рассматриваемом случае должна иметь гармоника  $N = 4$ , близкая к волне БГК по фазовой скорости и имеющая наибольший параметр  $\alpha = 0.47$  [4]. На рис. 1, а — г показана зависимость от времени амплитуды волны БГК  $N = 3$  и амплитуды гармоник  $N = 1 - 30$  (рис. 1, а), амплитуды гармоник  $N = 1$  (рис. 1, б),  $N = 2$  (рис. 1, в) и  $N = 4$  (рис. 1, г). Из рис. 1, а видно, что амплитуда волны БГК остается постоянной. Амплитуды остальных гармоник начинают расти в  $t/T_{oe} > 25$  и имеют шумовой характер. Никакие гармоники не выделяются из общего шумового фона. Из рис. 1, г видно, что не наблюдается систематического роста и амплитуды гармоники  $N = 4$ . Зависимость  $E^{IV}(t)$  (рис. 1, г) имеет шумовой характер. Кривая  $E^{IV}(t)$  имеет такой же вид как  $E^N(t)$  более высоких гармоник, а максимальная амплитуда  $E_{\max}^{IV}/E_0 \sim 0.08$  (здесь и далее  $E_0 = E_0^B$ ) не выходит за пределы шумов (рис. 1, а). Таким образом, неустойчивость спутников не развивается.

Не развивается и неустойчивость слияния. Действительно, неустойчивость слияния должна проявляться в уменьшении амплитуды гармоники  $N^B = 3$  и росте амплитуд более длинноволновых гармоник  $N < N^B$ , а наиболее наглядно в модуляции распределения плотности  $b$ -электронов с длиной модуляции  $\delta x > \lambda^B$  и в слиянии сгустков  $b$ -электронов на фазовой плоскости.

Из рис. 1, а — б видно, что амплитуда волны БГК  $N^B = 3$  остается постоянной, амплитуды затравочных волн — гармоник  $N = 1$  и  $N = 2$  также остаются постоянными до  $t/T_{oe} \sim 30 - 40$ . В  $t/T_{oe} > 30 - 40$  зависимость  $E^N(t)$  имеет шумовой характер, но в среднем амплитуда остается практически постоянной.

На рис. 2 показано распределение плотности  $b$ -электронов, на рис. 3 — фазовая плоскость  $b$ -электронов в  $t/T_{oe} = 0$  и 100. Видно, что сгустки

$b$ -электронов сохраняются в течение времени  $t/T_{oe} \sim 0 - 100$  (рис.3). Модуляции  $n_b(x)$  с длиной  $\delta x > \lambda^B$  не наблюдается (рис.2).

Таким образом, в случае 1 с  $L/\lambda^B = 3$  неустойчивость слияния сгустков не развивается в течение  $t/T_{oe} \sim 100$ ,  $\omega_{oe}t \sim 600$ . Отметим, что в работе [1] при исследовании волны БГК типа electron hole при  $L/\lambda^B = 3$  неустойчивость слияния проявлялась уже к  $\omega_{oe}t \sim 125$ .

Как уже отмечалось, при работе с волной БГК малой амплитуды заметную роль могут играть шумы. Из рис.1,а видно, что максимальные амплитуды шумов достигают довольно большой величины  $E_{\max}^N/E_0 \sim 0.5$ , а средний уровень  $E^N/E_0 \sim 0.3$ . Такие шумы могут привести к возмущению поля  $E(x)$  и плотности  $n_b(x)$  в волне БГК и, как следствие, к развитию паразитных стохастических явлений. Действительно, на рис.2 в  $t/T_{oe} = 100$  видна мелкомасштабная модуляция  $n_b(x)$ . Такая же модуляция видна и на кривых  $E(x)$ . По рис.3 видно, что к  $t/T_{oe} = 100$  некоторые  $b$ -электроны разбрасываются по фазовой плоскости в районе сепаратрисы и заполняют область узлов. Это показывает, что в районе сепаратрисы развивается стохастический слой [2, 3]. Однако, этот паразитный процесс не сказывается на крупномасштабных эффектах, которые интересуют нас в настоящей работе.

Случай 2. В этом случае  $L/r_d = 400$ ,  $\lambda^B/r_d = 100$ . В начальный момент времени задается волна БГК  $N^B = 4$  (табл. 1) и затравочные ленгмюровские волны  $N = 1, 2$  и  $3$  (табл. 3). Развитие волны БГК прослеживается до  $t/T_{oe} = 100$  ( $\omega_{oe}t \sim 600$ ).

На рис.4а — г показана зависимость от времени амплитуды волны БГК  $N = 4$  и амплитуды гармоник  $N = 1 - 30$  (рис.4,а), амплитуды гармоник  $N = 1$  (рис.4,б),  $n = 2$  (рис.4,в) и  $N=3$  (рис.4,г). Из рис.4,а видно, что амплитуда волны БГК остается постоянной. Амплитуды остальных гармоник начинают расти в  $t/T_{oe} > 25$  и имеют шумовой характер. Максимальные амплитуды достигают величины  $E_{\max}^N/E_0 \sim 0.35$ , средний уровень  $E^N/E_0 \sim 0.2$ . Никакие гармоники не выделяются из общего шумового фона. Не выделяется и кандидат в спутники — гармоника  $N = N^B + 1 = 5$  с фазовой скоростью, близкой к  $V_{\phi}^B$  волны БГК и максимальным для гармоник с  $N \geq N^B + 1$  параметром  $\alpha = 0.59$ . Анализ кривой  $E^V(t)$  для гармоники  $N = 5$  показывает, что систематического роста амплитуды не наблюдается —  $E^V(t)$  имеет шумовой характер, а максимальная амплитуда  $E_{\max}^V/E_0 \sim 0.04$  не выходит за пределы уровня шумов (рис.4,а). Таким образом, и в этом случае неустойчивость спутников не развивается.

Из рис.4,б — г видно, что амплитуды затравочных волн  $N = 1, 2$  и

3 остаются постоянными до  $t/T_{oe} \sim 40 - 50$ . В дальнейшем зависимость  $E^N(t)$  имеет шумовой характер, но в среднем амплитуда остается практически постоянной или меняется незначительно, не выходя за пределы уровня шумов.

На рис.5 показано распределение плотности  $b$ -электронов, на рис.6 — фазовая плоскость  $b$ -электронов в  $t/T_{oe} = 0$  и  $100$ . Видно, что сгустки  $b$ -электронов сохраняются в течение времени  $t/T_{oe} \sim 0 - 100$  (рис.6). Модуляции  $n_b(x)$  с длиной  $\delta x > \lambda^B$  не наблюдается, видна только паразитная коротковолновая модуляция (рис.5).

Таким образом, в случае 2 с  $L/\lambda^B = 4$  неустойчивость слияния сгустков не развивается в течение  $t/T_{oe} = 100$ ,  $\omega_{oe}t \sim 600$ . В работе [1] при  $L/\lambda^B = 4$  неустойчивость слияния проявлялась уже к  $\omega_{oe}t \sim 150$ .

Случай 3. В этом случае  $L/r_d = 300$ ,  $\lambda^B/r_d = 100$ . В начальный момент времени задается волна БГК  $N^B = 3$  (табл.1). Затравочные ленгмюровские волны не задаются, так что амплитуда гармоник  $N = 1, 2, 4$  задается начальным уровнем шумов (табл. 2 и 3). Развитие волны БГК прослеживается в течение длительного времени до  $t/T_{oe} = 500$  ( $\omega_{oe}t \sim 3000$ ).

На рис.7,а — г показана зависимость от времени амплитуды волны БГК  $N = 3$  и амплитуды гармоник  $N = 1 - 7$  (рис.7,а) и амплитуды гармоник  $N = 1$  (рис.7,б),  $N = 2$  (рис.7,в) и  $N = 4$  (рис.7,г). Из рис.7,а видно, что амплитуда волны БГК  $N = 3$  остается практически постоянной до  $t/T_{oe} \sim 250$  и немного (на несколько процентов) падает к  $t/T_{oe} \sim 500$ . Амплитуды гармоник  $n = 1 - 7$  и  $N = 8 - 30$  начинают расти в  $t/T_{oe} > 20 - 30$  и имеют шумовой характер. Максимальные амплитуды гармоник  $N = 1 - 7$  достигают величины  $E_{\max}^N/E_0 \sim 0.25$ , гармоник  $N = 8 - 30$  —  $E_{\max}^N/E_0 \sim 0.45$ , средний уровень для  $N = 1 - 7$   $E^N/E_0 \sim 0.2$  для  $N = 8 - 30$  —  $E^N/E_0 \sim 0.25$ . И в этом случае нет гармоник, которые выделяются из общего шумового фона. Не выделяется и кандидат в спутники — гармоника  $N = 4$  с  $V_{\phi}^N$ , близкой к  $V_{\phi}^B$  волны БГК и параметром  $\alpha = 0.47$ . По кривой  $E^{IV}(t)$  для этой гармоники (рис.7,г) видно, что зависимость  $E^{IV}(t)$  имеет шумовой характер, систематического роста амплитуды не наблюдается, максимальная амплитуда  $E_{\max}^{IV}/E_0 \sim 0.16$  не выходит за пределы уровня шумов. Таким образом, неустойчивость спутников не развивается и в течение длительного времени  $t/T_{oe} \sim 0 - 500$ .

Не развивается и неустойчивость слияния. Действительно, из рис.7,б, в видно, что систематического роста амплитуды гармоник  $N = 1$  и  $N = 2$  не наблюдается. Амплитуды этих гармоник возрастают в  $t/T_{oe} > 50$

одновременно с шумами. Зависимость  $E^N(t)$  имеет шумовой характер. Максимальные амплитуды гармоники  $N = 1$  —  $E_{\max}^I/E_0 \sim 0.027$  и  $N = 2$  —  $E_{\max}^{II}/E_0 \sim 0.045$  не выходят за пределы уровня шумов.

На рис.8 показано распределение плотности  $b$ -электронов, на рис.9 — фазовая плоскость  $b$ -электронов в разные моменты времени в интервале  $t/T_{oe} \sim 0 - 500$ . Видно, что длинноволновой ( $\delta x > \lambda^B$ ) модуляции плотности  $n_b(x)$  не наблюдается (рис.8). Сгустки  $b$ -электронов сохраняются в течение всего интервала  $t/T_{oe} \sim 0 - 500$  (рис.9), хотя паразитные эффекты и приводят к заметному разбросу  $b$ -электронов в окрестности сепаратрисы. Сохранение распределения плотности  $n_b(x)$  в волне БГК в  $t/T_{oe} \sim 200 - 500$  (рис.8) показывает, что паразитные процессы не затрагивают основную часть сгустков, а развиваются на их периферии. Это подтверждает и анализ траекторий  $b$ -электронов на фазовой плоскости, который показывает, что основная часть  $b$ -электронов сохраняет замкнутые траектории захваченных частиц. В паразитном стохастическом процессе участвуют только частицы из небольшого слоя вблизи сепаратрисы.

Таким образом, в отсутствие неустойчивости сателлитов волна БГК с областью захвата, равномерно заполненной электронами, остается устойчивой в течение длительного времени  $t/T_{oe} \sim 500$ ,  $\omega_{oe}t \sim 3000$ . Неустойчивость слияния сгустков не наблюдается ни в случае 3 без начального возмущения, ни в случаях 1 и 2 с начальным возмущением на гармониках  $N < N^B$ .

## Литература

1. A. Ghizzo, B. Izrar, P. Bertrand, E. Fijalkow, M.R. Feix, M. Shoucri. Phys. Fluids **31**(1), 72, 1988.
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. Взаимодействие с ленгмюровской волной. Стохастические эффекты. Препринт ИЯФ 93-98, 1993.
4. Г.А. Артин, Н.С. Бучельникова, Б.Н. Лазеев. Волна Бернштейна–Грина–Крускала в длинной системе. I. Неустойчивость сателлитов. Препринт ИЯФ 95-23, 1995.
5. Г.А. Артин, Н.С. Бучельникова, Б.Н. Лазеев. Волна Бернштейна–Грина–Крускала в длинной системе. II. Неустойчивость сателлитов. Препринт ИЯФ 95-24, 1995.
6. I.A. Byers, M.S. Grewal. Phys. Fluids **13**, 1819, 1970.

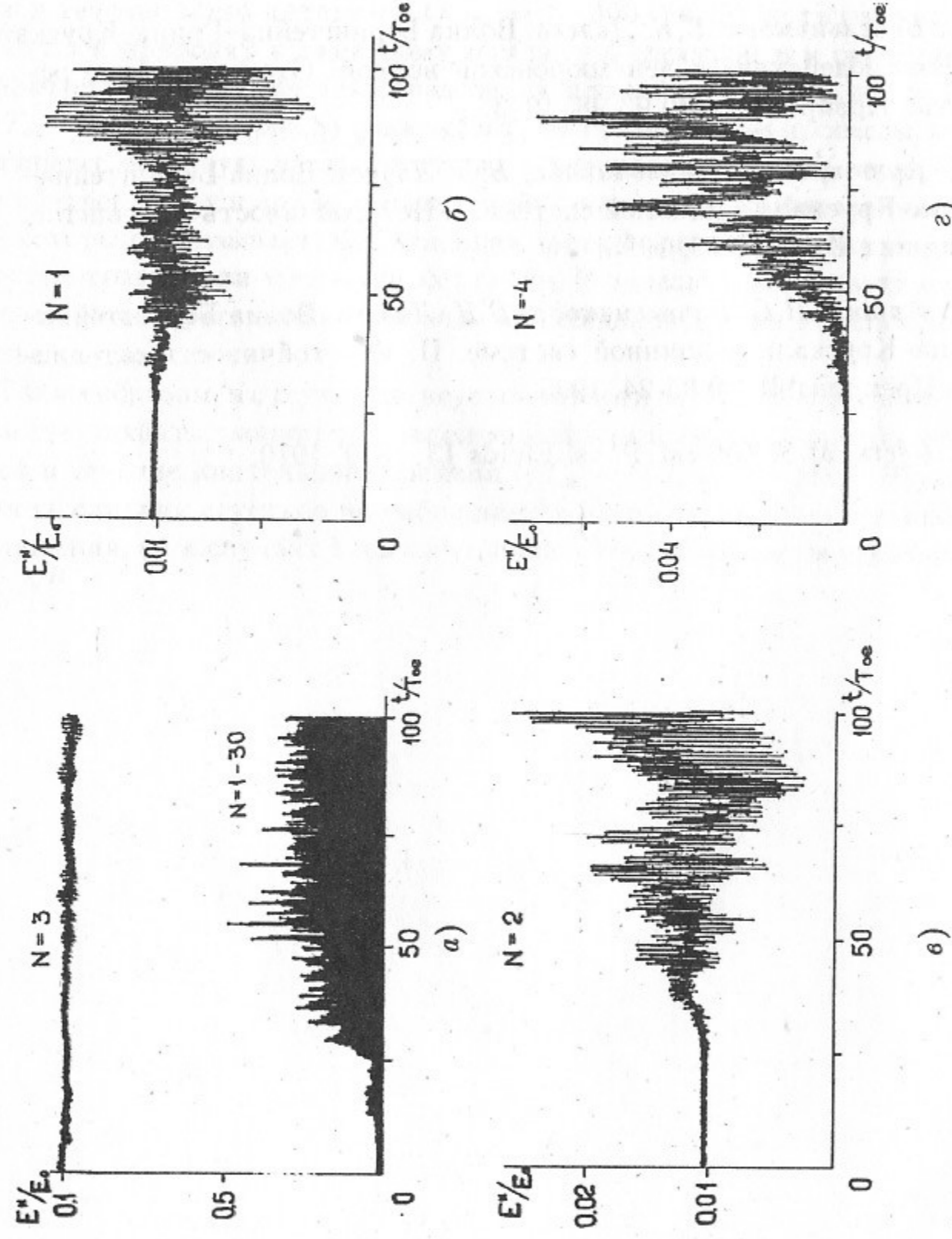


Рис. 1. Зависимость от времени амплитуды волны БГК  $N = 3$  и гармоник. Случай 1.  $E_0/(m\gamma_d/eT_{oe}^2) = 1.95$ .

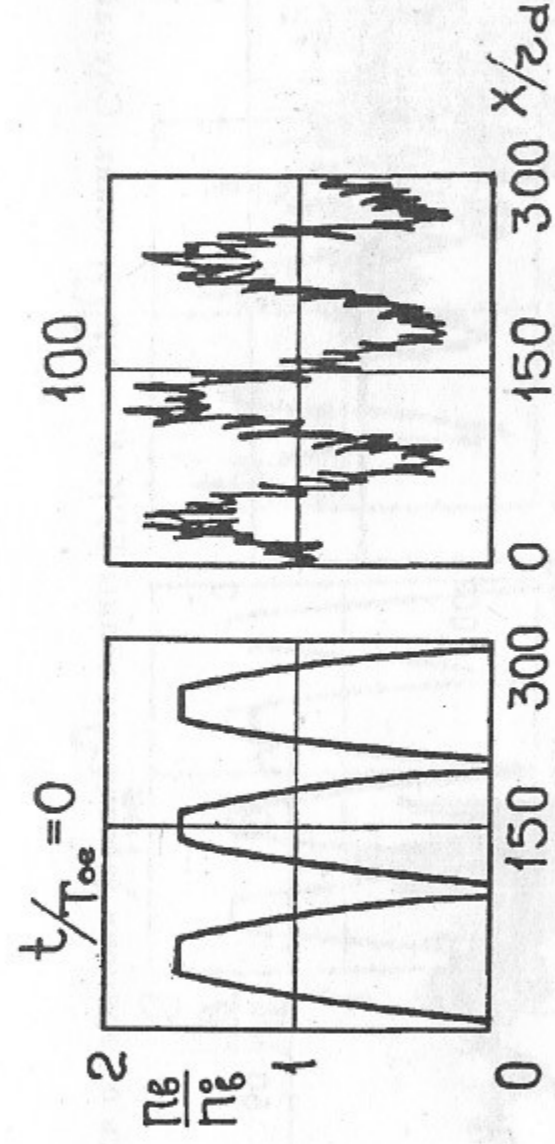


Рис. 2. Распределение плотности  $b$ -электронов  $n_b/n_b^0$  в  $t/T_{oe} = 0$  и 100. Случай 1.  $n_b^0 = N_b'/\lambda^B = 30$  — средняя плотность  $b$ -электронов в  $t = 0$ .

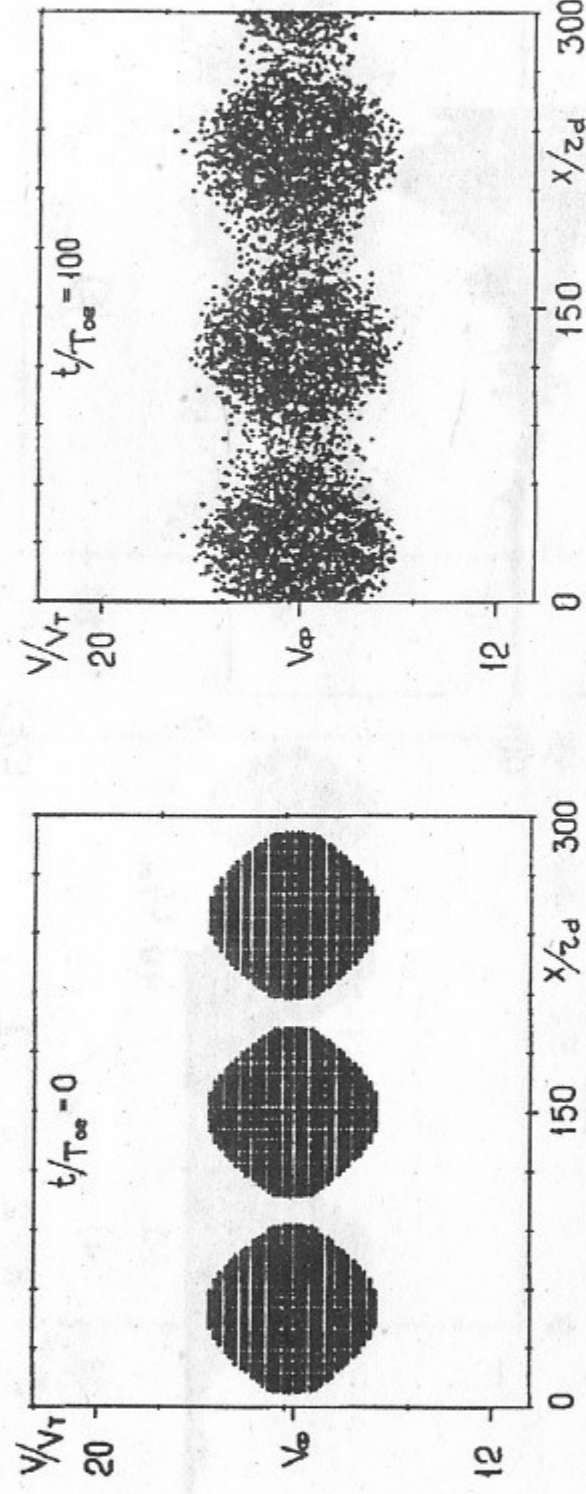


Рис. 3. Фазовые плоскости электронов в  $t/T_{oe} = 0$  и 100. Случай 1.

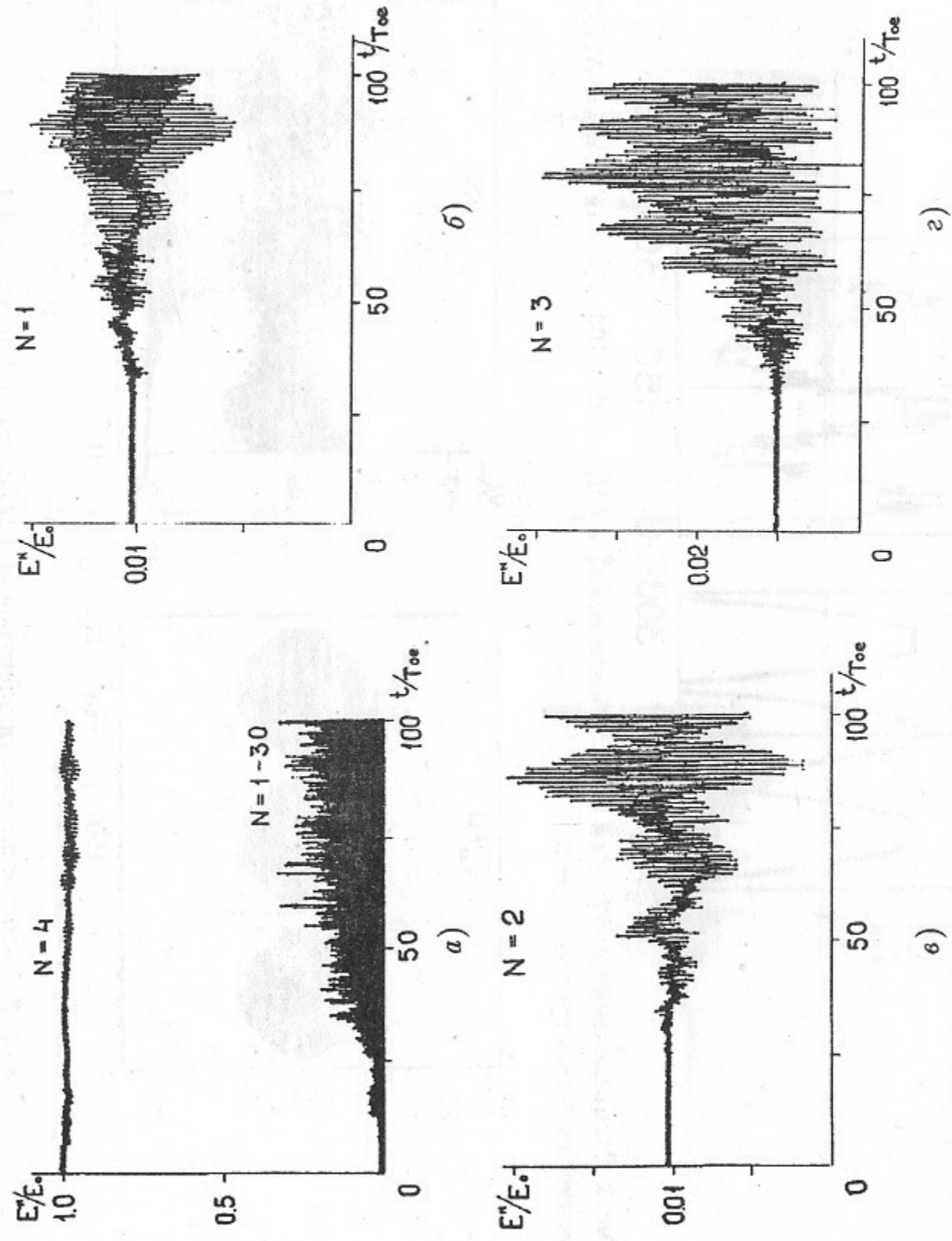


Рис. 4. Зависимость от времени амплитуды волны БГК  $N = 4$  и гармоник. Случай 2.  $E_0/(m\tau_d/eT_{0e}^2) = 1.95$ .

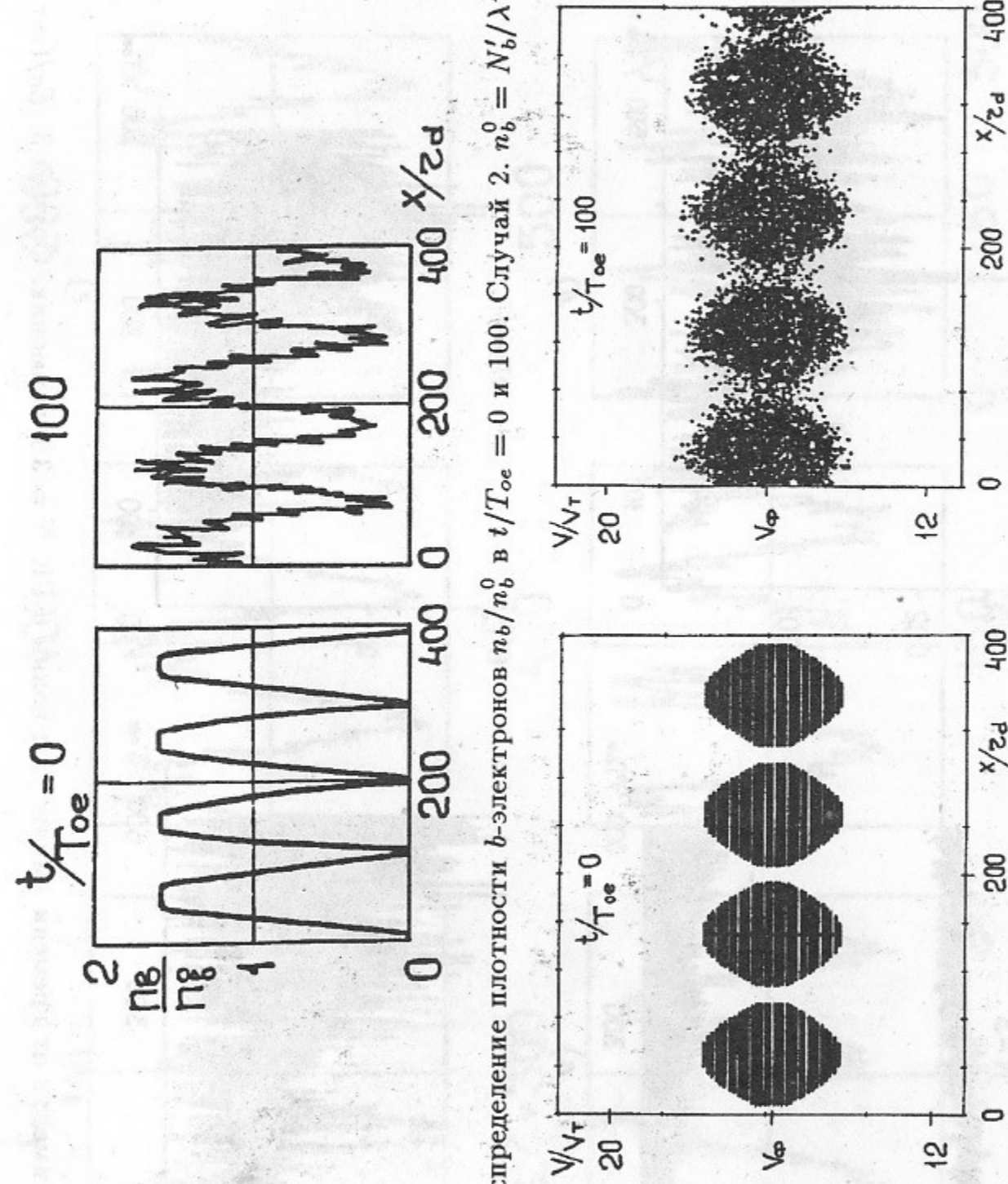


Рис. 5. Распределение плотности  $b$ -электронов  $n_b/n_0^0$  в  $t/T_{0e} = 0$  и  $100$ . Случай 2.  $n_b^0 = N_b^0/\lambda^B = 30$ .

Рис. 6. Фазовые плоскости электронов в  $t/T_{0e} = 0$  и  $100$ . Случай 2.



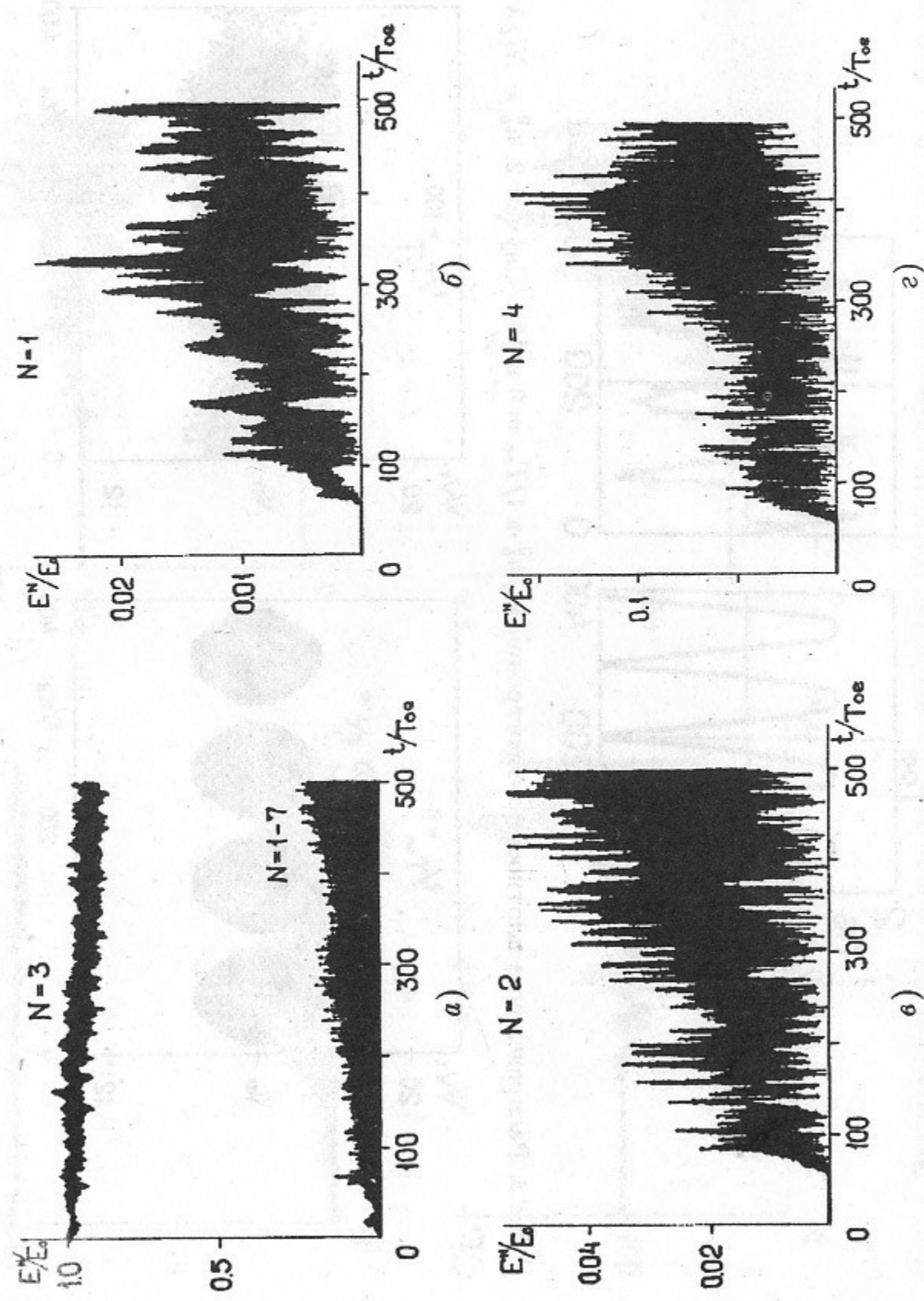


Рис. 7. Зависимость от времени амплитуды волны БГК  $N = 3$  и гармоник. Случай 3.  $E_0/(m\gamma_d/eT_{0e}^2) = 1.95$ .

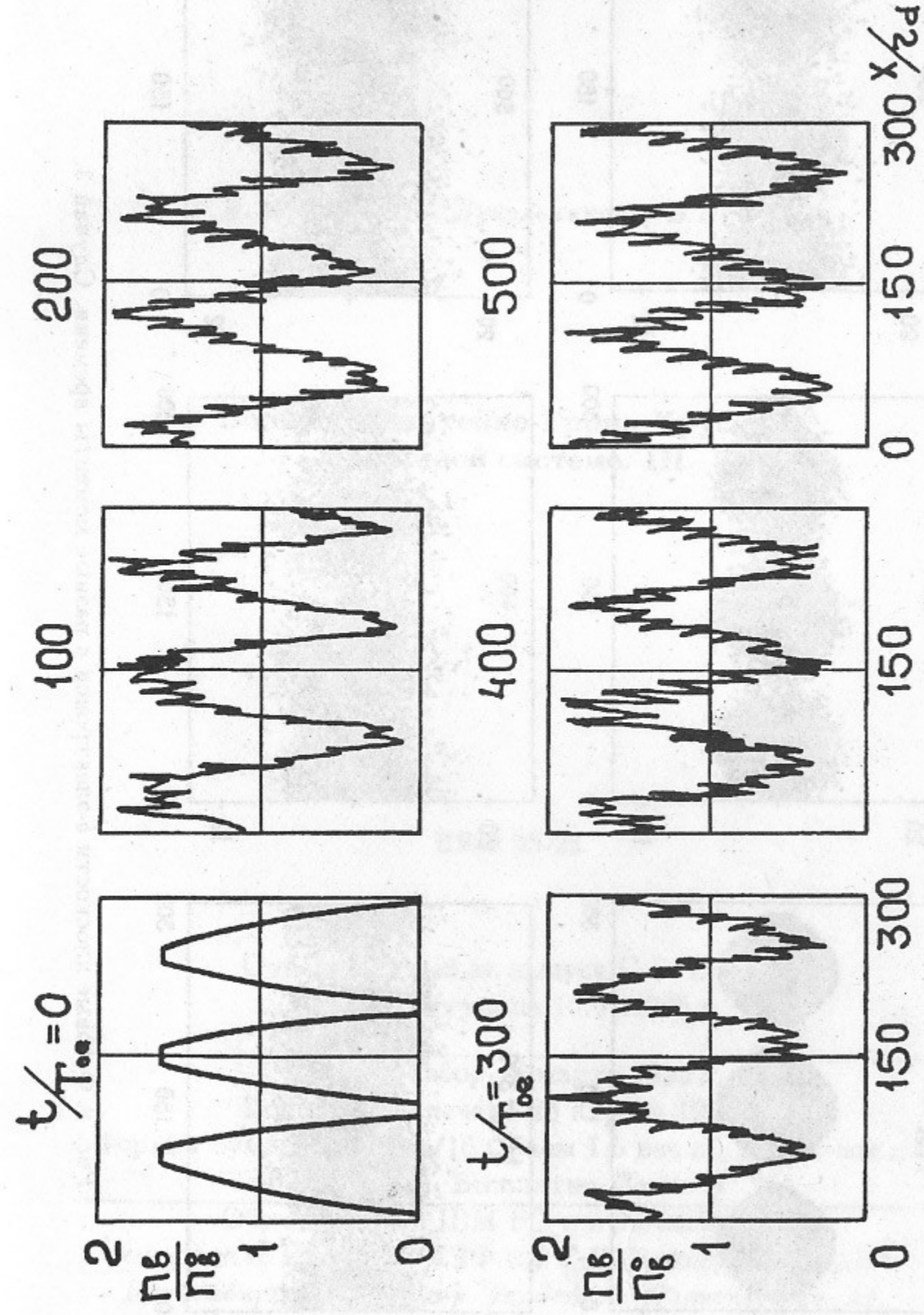


Рис. 8. Распределение плотности  $b$ -электронов  $n_b/n_0^0$  в разные моменты времени. Случай 3.  $n_0^0 = N_0^0/\lambda^B = 30$ .

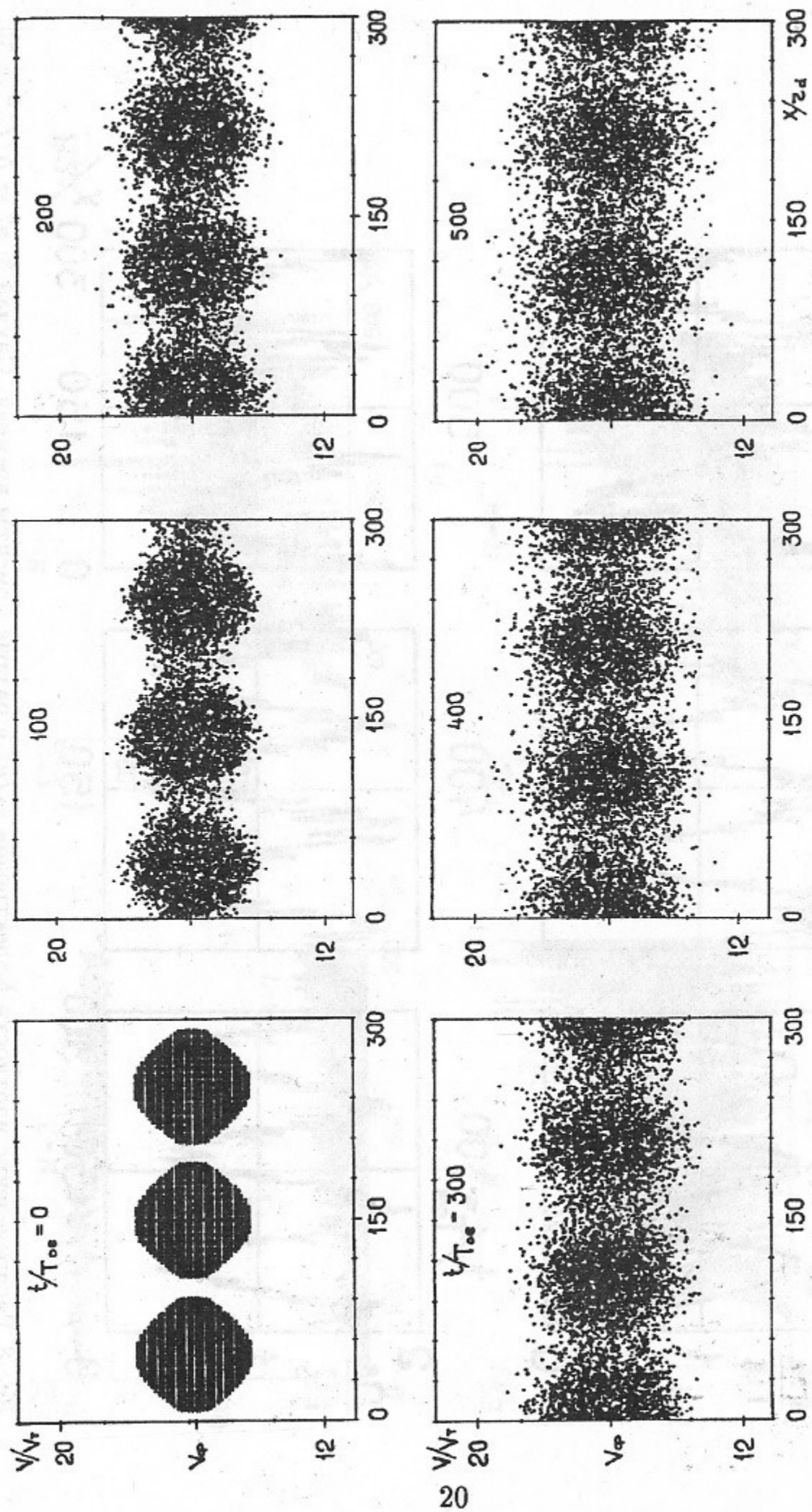


Рис. 9. Фазовые плоскости  $b$ -электронов в разные моменты времени. Случай 3.

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

Волна Бернштейна-Грина-Крускала  
в длинной системе. III.

ИЯФ 95-25

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

---

Сдано в набор 16 марта 1995 г.  
Подписано в печать 26 апреля 1995 г.  
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1.5 печ.л., 1.2 уч.-изд.л.  
Тираж 250 экз. Бесплатно. Заказ № 25

---

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