

Государственный научный центр

Российской Федерации

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. Будкера СО РАН

Г.А. Артин, Н.С. Бучельникова

Волна Бернштейна-Грина-Крускала.

Конверсия и модуляционная неустойчивость. II

ИЯФ 97-29

НОВОСИБИРСК

1997

**Волна Бернштейна-Грина-Крускала.
Конверсия и модуляционная неустойчивость. II**

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 взаимодействия волны БГК ($\lambda/r_d = 200$; $N_e = L/\lambda = 1$; $V_\phi/V_T = 28$; $E_o/(\frac{mr_d}{eT_{oe}^2}) = 13,6$; $E_o^2/8\pi n_o T = 0,059$) с ионно-звуковой волной ($N_i = \lambda/\lambda_i = 3$; $\tilde{n}/n_o \sim 0,3 \div 0,9$). Работа является продолжением работы [1].

В работе [1] показано, что при $\tilde{n}/n_o \leq 0,1$ конверсия подавлена и волна БГК устойчива. С ростом \tilde{n}/n_o роль конверсии возрастает. Кроме того, становится существенным процесс перестройки распределения захваченных в волне БГК электронов при уменьшении её средней фазовой скорости. Этот процесс приводит к росту амплитуды волны БГК и росту скорости конверсии.

При $\tilde{n}/n_o \sim 0,3$ модуляция поля волны гармониками конверсии стимулирует модуляционную неустойчивость, которая приводит к коллапсу, затуханию поля и разрушению волны БГК.

При $\tilde{n}/n_o \geq 0,6$ развитие определяется конверсией, которая приводит к генерации большого числа гармоник $N = N_e \pm \beta N_i$, $\beta = 1, 2, 3, \dots, 8$. В районе областей захвата коротковолновых гармоник развивается сильная стохастическая неустойчивость движения электронов плазмы, что приводит к затуханию поля и разрушению волны БГК.

**The Bernstein-Greene-Kruskal wave.
The conversion and the modulational instability. II.**

G.A. Artin, N.S. Buchelnikova

Budker Institute of Nuclear Physics
630090 Novosibirsk, Russia

Abstract

The interaction of the BGK wave ($\lambda/r_d = 200$; $N_e = L/\lambda = 1$; $V_{ph}/V_T = 28$; $E_o/(\frac{mr_d}{eT_{oe}^2}) = 13,6$; $E_o^2/8\pi n_o T = 0,059$) with the ion-sound wave ($N_i = \lambda/\lambda_i = 3$; $\tilde{n}/n_o \sim 0,3 \div 0,9$) was studied in numerical experiments (PIC-method), which continue the work [1].

It was shown, that, if the ion-sound wave amplitude is $\tilde{n}/n_o \leq 0,1$, the conversion is suppressed and the BGK wave is stable [1]. If the amplitude \tilde{n}/n_o increases, the role of the conversion grows. Besides, if \tilde{n}/n_o increases, the phase velocity of the BGK wave decreases. This leads to the modification of the trapped electron distribution, which leads to the increase of the wave amplitude and the increase of the conversion growth rate.

If the ion-sound wave amplitude is $\tilde{n}/n_o \sim 0,3$, the modulation of the BGK wave field by the conversion modes leads to the modulational instability. The evolution of the instability leads

to the collapse and to the absorption of the field energy by the plasma electrons, which destroys the BGK wave.

If $\tilde{n}/n_o \geq 0,6$, the conversion leads to the excitation of the wide spectrum of the modes — $N = N_e \pm \beta N_i$, $\beta = 1, 2, 3, \dots 8$. The evolution of the large scale stochasticity of the plasma electron motion in the region of the shortwavelength conversion modes trapping regions leads to the damping of the electric field, which destroys the BGK wave.

В настоящей работе описаны численные эксперименты (метод частиц в ячейках) по исследованию устойчивости волны БГК типа сгустков захваченных электронов при взаимодействии с ионно-звуковой волной (синусоидальным возмущением плотности). Волна БГК такого типа представляет собой ленгмюровскую волну, область захвата которой заполнена электронами. Работа является продолжением работы [1].

В настоящей работе и работе [1] исследуется волна БГК с параметрами $\lambda = L = 200r_d$; $V_\phi/V_T = 28$; $E_0/(mr_d/eT_{oe}^2) = 13,6$; $E_0^2/8\pi n_o T = 5,9 \cdot 10^{-2}$; $\alpha^{I-II} = \frac{V_3^I + V_3^{II}}{V_\phi^I - V_\phi^{II}} \sim 0,62$; $V_3 = 2\sqrt{\frac{e\varphi}{m}}$ и ионно-звуковая волна (возмущение плотности) с $\lambda_i = 66,67r_d$, $N_i = \lambda/\lambda_i = 3$; $\tilde{n}/n_o \sim 0,01 \div 0,1$ (работа [1]), $\tilde{n}/n_o \sim 0,3 \div 0,9$ (настоящая работа). Проводится сравнение со случаем неподвижных ионов, где исключена модуляционная неустойчивость, и сравнение с ленгмюровской волной с такими же параметрами, как у волны БГК.

Описание численного эксперимента приведено в работе [1].

Для анализа основных процессов при заданных параметрах основной и ионно-звуковой волны (возмущения плотности) рассматривается четыре случая (серия): ленгмюровская волна в плазме с неподвижными $M/m = 10^{10}$ (случаи 7-1, 9-1, 11-1) и подвижными $M/m = 10^2$ (случаи 7-2, 9-2, 11-2) ионами и волна БГК в плазме с неподвижными (случаи 8-1, 10-1, 12-1) и подвижными (случаи 8-2, 10-2, 12-2) ионами.

В работе [1] рассматриваются серии 1-2-3 с $\tilde{n}/n_o = 0,01 - 0,04 - 0,1$, в настоящей работе — серии 4-5-6 с $\tilde{n}/n_o = 0,3 - 0,6 - 0,9$. Нумерация случаев общая. Отметим, что случаи 8-1, 10-1 и 12-1 совпадают со случаями 1-3, 1-4 и 1-5 соответственно в работе [2,3]. Параметры основной и ионно-звуковой волны (возмущения плотности) приведены в таблице 1.

Таблица 1. Начальные параметры волн.

Серии 4,5 и 6: $L/r_d = \lambda/r_d = 200$; $N = L/\lambda = 1$; $E_0/(mr_d/eT_{oe}^2) = 13,6$; $V_3/V_T = 6,62$; $E_0^2/8\pi n_o T = 5,9 \cdot 10^{-2}$; $\alpha^{I-II} \sim 0,62$; $N_b^0 = 50$; $N_b^I = 1,35 \cdot 10^4$; $\lambda_i/r_d = 66,67$;
 $N_i = L/\lambda_i = 3$; $T_e/T_i = 30$.

Серия	Серия 4. $\tilde{n}/n_o = 0.3$				Серия 5. $\tilde{n}/n_o = 0.6$				Серия 6. $\tilde{n}/n_o = 0.9$			
Случай	7-1	7-2	8-1	8-2	9-1	9-2	10-1	10-2	11-1	11-2	12-1	12-2
Тип волны	Л	Л	БГК	БГК	Л	Л	БГК	БГК	Л	Л	БГК	БГК
M/m	10^{10}	10^2	10^{10}	10^2	10^{10}	10^2	10^{10}	10^2	10^{10}	10^2	10^{10}	10^2
V_ϕ/V_T	31.88	32.04	27.95	28.09	31.88	32.04	27.95	28.09	31.88	32.04	27.95	28.09

L , λ – длина системы и длина волны; N – номер гармоники; E_0 – начальная амплитуда; $V_3 = 2\sqrt{\frac{e\varphi}{m}}$; $\alpha^{I-II} = \frac{V_3^I + V_3^{II}}{V_\phi^I - V_\phi^{II}}$ ($V_\phi^I/V_T = 16,01$ при $M/m = 10^{10}$; $V_\phi^{II}/V_T = 16,09$

при $M/m = 10^2$); N_b^0, N_b^1 – число захваченных электронов и число ”взвешенных” b -электронов на длине λ ; $\lambda_i, N_i, \tilde{n}/n_0$ – длина волны, номер гармоники и амплитуда ионно-звуковой волны (возмущения плотности), T_e, T_i – температура электронов и ионов; тип волны – ленгмюровская (Л) или БГК волна; M, m – масса ионов и электронов; V_ϕ – фазовая скорость волны.

Рассмотрим развитие ленгмюровской волны и волны БГК при взаимодействии с возмущением плотности — ионно-звуковой волной.

Серия 4. $E_o = 13,6$ (здесь и далее E_o нормировано на $\frac{m r_d}{e T_{oe}^2}$), $\tilde{n}/n_o = 0,3$. Случаи 7-1, 7-2 (ленгмюровская волна, $M/m = 10^{10}, 10^2$), 8-1, 8-2 (волна БГК, $M/m = 10^{10}, 10^2$). Кривые, описывающие случаи серии 4, приведены на рис. 1-20.

Ранее [4-7] и в работе [1] показано, что взаимодействие ленгмюровской волны с возмущением плотности (ионно-звуковой волной) приводит к конверсии — генерации гармоник — прямых и обратных ленгмюровских волн с волновыми векторами $k_N = k_e \pm \beta k_i$ и номерами гармоник $N = N_e \pm \beta N_i$, $\beta = 1, 2, 3, \dots$. При малых возмущениях плотности \tilde{n}/n_o возбуждается небольшое число гармоник и процесс имеет периодический характер [1,4,6]. С ростом \tilde{n}/n_o число гармоник растёт и процесс приобретает каскадный характер [4,5].

На рис. 1, 2 показаны кривые $E^N(t)$ для случаев 7-1 и 7-2. В этих случаях конверсия имеет каскадный характер — возбуждается большое число гармоник $N = N_e \pm \beta N_i$ — $N = -2$ и 4, $N = -5$ и 7, $N = -8$ и 10 и т.д. (знаком “-” обозначены обратные волны с $V_\phi^N < 0$, на рисунках знак “-” не пишется).

Возбуждение коротковолновых гармоник (большие N) с малыми фазовыми скоростями приводит к захвату ими электронов плазмы и развитию сильной стохастической неустойчивости движения электронов в районе их областей захвата (процесс такого типа исследовался ранее [8]). По фазовым плоскостям электронов рис. 15 (случай 7-1) и рис. 16 (случай 7-2) видно появление ускоренных электронов в $t/T_{oe} \sim 10$ и развитие сильной стохастической неустойчивости. По максимальным скоростям электронов в $t/T_{oe} \sim 100$ ($V_{max}/V_T \sim 5,7$, $V_{min}/V_T \sim -5,2$ в случае 7-1 и $V_{max}/V_T \sim 4,9$, $V_{min}/V_T \sim -4,5$ в случае 7-2) можно сделать вывод, что сильная стохастическая неустойчивость развивается в районе областей захвата гармоник $N \geq 7$, $N \geq |-8|$ в обоих случаях (предельное N оценивается из условия $V_{max} \geq V_\phi^N$, $|V_{min}| \geq |V_\phi^{-N}|$).

Ускорение электронов при развитии сильной стохастической неустойчивости приводит к затуханию поля и поглощению его энергии электронами плазмы (рис. 5, 6). Продолжающаяся конверсия приводит к перекачке энергии из основной волны и длинноволновых гармоник в коротковолновые. В результате все гармоники затухают (рис. 1, 2).

Развитие конверсии приводит к модуляции поля волны. Сравнение распределения поля $E(x)$ в разные моменты времени в случаях 7-1 (рис. 13) и 7-2 (рис. 12) показывает, что развитие модуляции практически одинаково в обоих случаях. Модуляционная неустойчивость в случае 7-2 практически не играет роли. Действительно,

по кривым $\tilde{n}(x)$ (рис. 12) видно, что глубина впадин плотности меняется незначительно.

Сравнение рис. 1-2, 5-6, 12-13, 15-16 показывает, что развитие процесса в плазме с неподвижными (случай 7-1) и подвижными (случай 7-2) ионами практически одинаково. Таким образом, в случае 7-2 определяющую роль играет конверсия, а модуляционная неустойчивость несущественна.

Следует отметить, что в случае 7-2 начинают играть роль процессы, связанные с ионной нелинейностью, — затухание ионно-звуковой волны при захвате электронов, укручение волны, захват ионов. Для выяснения роли этих процессов были проведены численные эксперименты, в которых задавалась одна ионно-звуковая волна с параметрами случая 7-2, а также случаев 9-2 и 11-2 ($L/r_d = 200$; $N_i = 3$; $\tilde{n}/n_o = 0,3$; $0,6$ и $0,9$). Было найдено, что развитие ионно-звуковой волны в этих случаях мало отличается от случаев 7-2, 9-2, 11-2. Так в случае 7-2 практически одинаковы кривые $\tilde{n}^N(t)$ (рис. 9), фазовые плоскости ионов в одинаковые моменты времени (рис. 19).

По кривым $\tilde{n}^N(t)$ (рис. 9) видно, что в случае 7-2 с самого начала становится существенным затухание ионно-звуковой волны $N_i = 3$. Можно предположить, что оно обусловлено захватом электронов. Действительно, начальная часть кривой $\tilde{n}^N(t)$ (рис. 9) в $t/T_{oe} \sim 0 - 25$ хорошо описывается формулой для затухания ионно-звуковой волны на электронах [9]: $\tilde{n}^N = \tilde{n}_o^N \exp(-\gamma_i t) = \tilde{n}_o^N \exp(-2\pi \frac{\gamma_i}{\omega_{oe}} \frac{t}{T_{oe}})$, где $\gamma_i = \omega_s \sqrt{\frac{\pi m}{8M}}$; $\omega_s^2 = \frac{c_s^2}{1+(k_i r_d)^2} k_i^2$; $c_s = \sqrt{T_e/M}$.

По фазовым плоскостям ионов (рис. 19) видно, что в $t/T_{oe} \geq 20$ начинает играть роль укручение ионно-звуковой волны. Это приводит к дальнейшему уменьшению амплитуды $N_i = 3$ и росту гармоники $N_i = 6$ (рис. 9). Дальнейшее развитие ионно-звуковой волны приводит к захвату некоторого числа ионов (рис. 19), росту энергии ионов ΔW_i (рис. 6) и установлению нелинейной ионно-звуковой волны (рис. 19 $t/T_{oe} \sim 100$).

Развитие волны БГК в случаях 8-1, 8-2 отличается от ленгмюровской волны. Существенную роль в этих случаях играет процесс, связанный с уменьшением средней фазовой скорости в плазме с возмущением плотности. В работе [2-1] показано, что при $M/m = 10^{10}$ и $\tilde{n}/n_o = 0,3$ (случай 8-1) средняя фазовая скорость меняется от начальной $V_\phi/V_T = 27,95$ до $V_\phi/V_T = 26,29$.

Уменьшение средней фазовой скорости приводит к перестройке распределения b-электронов на фазовой плоскости. Это можно видеть по фазовым плоскостям электронов в случаях 8-1 (рис. 17) и 8-2 (рис. 18). Сравнение рис. 17 и 18 показывает, что до $t/T_{oe} \sim 15 - 20$ процесс развивается одинаково в обоих случаях. Основная часть b-электронов в среднем замедляется, подстраиваясь к новой фазовой скорости и оставаясь захваченными волной БГК. При замедлении b-электроны теряют энергию, так что потери энергии $\Delta W_b = -(W_b - W_b^o)$ растут (рис. 7, 8). При этом энергия передаётся в электрическое поле, так что амплитуда волны БГК $N = 1$ растёт до $E_{max}^N/E_o \sim 1,76$ (рис. 3, 4) растут соответственно и энергия поля W_E , и энергия возмущения электронов $\Delta W_e = W_e - W_e^o$ (рис. 7, 8). К $t/T_{oe} \sim 20 - 30$ перестройка

завершается и устанавливается волна БГК с новыми параметрами (рис. 17).

Одновременно с этим процессом развивается конверсия — каскадный процесс, который приводит к возбуждению большого числа гармоник (рис. 3, 4). До $t/T_{oe} \sim 10$ развитие процесса в случаях 8-1 и 8-2 почти одинаково, однако, в дальнейшем развитие существенно различно.

В случае 8-1 определяющую роль играет конверсия. По сравнению с ленгмюровской волной (случай 7-1) развитие конверсии в случае 8-1 замедлено. Действительно, из сравнения случаев 7-1 и 8-1 (рис. 1 и 3, 5 и 7) видно, что в случае 7-1 затухание начинается с самого начала и к $t/T_{oe} \sim 40$ приводит к практически полному затуханию поля. В случае 8-1 затухание начинается только в $t/T_{oe} > 10 - 15$, что указывает на более позднее возбуждение коротковолновых гармоник в этом случае. Как и в случае 7-1, затухание определяется захватом электронов плазмы этими гармониками и развитием сильной стохастической неустойчивости (рис. 17). По максимальным скоростям электронов в $t/T_{oe} \sim 100$ в случае 8-1 ($V_{max}/V_T \sim 9,2$, $V_{min}/V_T \sim -7,3$) можно сделать вывод, что сильная стохастическая неустойчивость развивается в районе областей захвата $N \geq 4$, $N \geq |-5|$. Сильная стохастическая неустойчивость и затухание поля в случае 8-1 развивается значительно медленнее, чем в случае 7-1 (рис. 15 и 17, 5 и 7). В результате амплитуда волны БГК, хотя и падает, но до $t/T_{oe} \sim 100$ остаётся достаточно большой (рис. 3), а сильная стохастическая неустойчивость распространяется на области захвата более длинноволновых гармоник $N = 4$ и -5 , чем в случае 7-1.

Конверсия в случае 8-1 приводит к сильной модуляции поля (рис. 11). Однако, несмотря на модуляцию и затухание поля, волна БГК сохраняется до $t/T_{oe} \sim 100$. Действительно, из рис. 11, 17 видно, что распределение в-электронов на фазовой плоскости и распределение плотности в-электронов $n_b(x)$ сохраняет характер сгустка электронов.

Случай 8-2 существенно отличается от случая 8-1, так как кроме конверсии в случае 8-2 развивается модуляционная неустойчивость. Действительно, из рис. 14 видно, что поле модулируется и концентрируется во впадинах плотности, а глубина впадин в $t/T_{oe} \sim 0 - 20$ растёт. В это же время растут и гармоники плотности $\tilde{n}^N(t)$ $N_i = 3; 6; 9; 12$ (рис. 10).

Развитие конверсии и модуляционной неустойчивости приводит к коллапсу — амплитуда гармоник (рис. 4), плотность энергии во впадинах плотности (рис. 14) достигает максимальной величины ($E_{max}^2/8\pi n_o T \sim 1,3$) в $t_{max}/T_{oe} \sim 9 - 10$. После этого поле быстро (до $t/T_{oe} \sim 25$) затухает (рис. 4, 8), энергия поля поглощается электронами плазмы (рис. 8) и волна БГК разрушается (рис. 14, 18). Затухание поля, как и в случае 8-1, определяется сильной стохастической неустойчивостью (рис. 18). По максимальным скоростям электронов в $t/T_{oe} \sim 100$ в случае 8-2 ($V_{max}/V_T \sim 7,1$, $V_{min}/V_T \sim -7,2$) можно сделать вывод, что сильная стохастическая неустойчивость развивается в районе областей захвата гармоник $N \geq 7$ и $N \geq |-5|$.

После затухания поля волны БГК развитие ионно-звуковой волны определяется

укручением волны и захватом ионов (рис. 20), подобно случаю 7-2 (рис. 19). Небольшое отличие случая 8-2 связано с возмущением скоростей ионов пондеромоторной силой при модуляционной неустойчивости (рис. 20).

Таким образом, в случае 8-2 (волна БГК) при амплитуде ионно-звуковой волны $\tilde{n}/n_o \sim 0,3$ передача части энергии b-электронов в поле волны БГК при перестройке распределения b-электронов приводит к заметному росту плотности энергии, в результате чего кроме конверсии развивается модуляционная неустойчивость и коллапс. В случае ленгмюровской волны 7-2 модуляционная неустойчивость не играет роли и развитие практически полностью определяется конверсией.

Серия 5. $E_o = 13,6$; $\tilde{n}/n_o = 0,6$. Случаи 9-1, 9-2 (ленгмюровская волна, $M/m = 10^{10}, 10^2$), 10-1, 10-2 (волна БГК, $M/m = 10^{10}, 10^2$). Кривые, описывающие случаи серии 5, приведены на рис. 21-38.

На рис. 21, 22 приведены кривые $E^N(t)$ для случаев 9-1 и 9-2. В этих случаях уже в первые $1 - 2 T_{oe}$ возбуждается большое число гармоник $N = N_e \pm \beta N_i$, $\beta = 1, 2, 3, \dots$ вплоть до $\beta \sim 7 - 8$. Возбуждение коротковолновых гармоник приводит к захвату ими электронов плазмы и развитию сильной стохастической неустойчивости движения электронов в районе их областей захвата. По фазовым плоскостям электронов в случае 9-2 (рис. 33) видно, что этот процесс начинается в $t/T_{oe} \leq 4$. Фазовые плоскости в случае 9-1 практически не отличаются от случая 9-2. По максимальным скоростям электронов в $t/T_{oe} \sim 20$ ($V_{max}/V_T \sim 4,5$, $V_{min}/V_T \sim -5,1$ в случае 9-1 и $V_{max}/V_T \sim 4,9$, $V_{min}/V_T \sim -4,5$ в случае 9-2) можно сделать вывод, что сильная стохастическая неустойчивость в обоих случаях развивается в районе областей захвата гармоник $N \geq 10$ и $N \geq |-8|$.

Ускорение электронов при развитии сильной стохастической неустойчивости приводит к затуханию поля и поглощению его энергии электронами плазмы (рис. 25, 26). К $t/T_{oe} \sim 10$ поле и все гармоники практически полностью затухают (рис. 21, 22, 25, 26).

Развитие конверсии приводит к модуляции поля практически одинаковой в случаях 9-1 и 9-2 (рис. 29). Модуляционная неустойчивость в случае 9-2 практически не играет роли. Действительно, глубина впадин плотности практически не растёт (рис. 29), а появление гармоник $N_i = 6; 9$ (рис. 31) определяется укрупнением ионно-звуковой волны, которое в случае 9-2 проявляется с самого начала.

Сравнение рис. 21-22, 25-26, фазовых плоскостей электронов показывает, что развитие процесса в плазме с неподвижными (случай 9-1) и подвижными (случай 9-2) ионами практически одинаково. Таким образом в случае 9-2 развитие определяется конверсией и сильной стохастической неустойчивостью.

Развитие ионно-звуковой волны в случае 9-2 мало отличается от случая волны БГК 10-2. Это видно из сравнения кривых $\tilde{n}^N(t)$ (рис. 31 и 32). Фазовые плоскости ионов в случаях 9-2 и 10-2 практически не различаются, поэтому приведён только рис. 38 для случая 10-2. Анализ рис. 38 приведён ниже.

Развитие волны БГК в случаях 10-1, 10-2 практически не различается (рис. 23-24,

27-28), но отличается от ленгмюровской волны. Существенную роль в этих случаях играет процесс перестройки, связанный с уменьшением средней фазовой скорости волны. Развитие этого процесса в случае 10-1 было рассмотрено в работе [3], случай 1-4. Фазовые плоскости электронов в случае 10-2 приведены на рис. 34. Сравнение со случаем 10-1 (работа [3], случай 1-4, рис. 17) показывает, что фазовые плоскости в случаях 10-1 и 10-2 практически не различаются. Процесс перестройки начинает развиваться в $t/T_{oe} > 1-2$. Развитие этого процесса приводит к росту потерь энергии b -электронов (рис. 27, 28) и как следствие к росту амплитуды волны БГК (рис. 23, 24) и к росту $W_E, \Delta W_e$ (рис. 27, 28) до $t/T_{oe} \sim 7$.

Одновременно с этим процессом развивается конверсия, которая приводит к возбуждению большого числа гармоник $N = N_e \pm \beta N_i$ вплоть до $\beta = 8, N = -23$ и 25. Возбуждение коротковолновых гармоник приводит к развитию сильной стохастической неустойчивости. Развитие этих процессов в случае 10-1 подробно рассмотрено в работе [3].

По фазовым плоскостям электронов в случаях 10-2 (рис. 34) и 10-1 (рис. 17 в работе [3]) видно, что захват электронов и развитие сильной стохастической неустойчивости начинаются в $t/T_{oe} \leq 3$ и мало различаются в случаях 10-1 и 10-2. По максимальным скоростям электронов в $t/T_{oe} \sim 20$ ($V_{max}/V_T \sim 7,8, V_{min}/V_T \sim -6,5$ в случае 10-1 и $V_{max}/V_T \sim 8,2, V_{min}/V_T \sim -7,6$ в случае 10-2) можно сделать вывод, что сильная стохастическая неустойчивость развивается в районе областей захвата гармоник $N \geq 7, N \geq |-8|$ (случай 10-1) и $N \geq 4, N \geq |-5|$ (случай 10-2).

Ускорение электронов при сильной стохастической неустойчивости приводит к затуханию поля. К $t/T_{oe} \sim 10$ поле и все гармоники затухают (рис. 23, 24, 27, 28), а энергия поля поглощается электронами плазмы.

Модуляционная неустойчивость в случае 10-2 практически не играет роли, несмотря на сильную модуляцию поля (рис. 30). Действительно, глубина впадин плотности практически не растёт (рис. 30), а появление гармоник $N_i = 6; 9$ (рис. 32) определяется укрупнением ионно-звуковой волны.

Таким образом, развитие процесса в случае 10-2 определяется перестройкой волны БГК, конверсией и сильной стохастической неустойчивостью.

Хотя поле к $t/T_{oe} \sim 10$ затухает, процесс на этом не заканчивается, так как перестройка распределения b -электронов продолжается (рис. 34, $t/T_{oe} \sim 10 - 40$; рис. 30, $t/T_{oe} \sim 6,8 - 10$; рис. 37, $t/T_{oe} \sim 20 - 40$). По распределению плотности b -электронов $n_b(x)$ (рис. 30, 37) видно, что b -электроны периодически собираются в сгусток ($t/T_{oe} \sim 10$ и ~ 30), а поле W_E и амплитуда гармоник $N = 1$ возрастают (рис. 35, 36, $t/T_{oe} \sim 25 - 40$). Однако, конверсия снова приводит к затуханию поля и в $t/T_{oe} > 40$ оно окончательно затухает и волна БГК разрушается (рис. 34, 35, 36, 37).

Параллельно с развитием основной волны развивается ионно-звуковая волна. В случае 10-2 так же, как в случаях 7-2 и 8-2 на начальной стадии играет роль за-

тухание ионно-звуковой волны при захвате электронов. Параллельно развивается укрупнение волны, что видно по фазовым плоскостям ионов (рис. 38) и распределению возмущения плотности $\tilde{n}(x)$ (рис. 30, 37). Укрупнение проявляется в появлении гармоник $N_i = 6; 9$ и уменьшении амплитуды волны $N_i = 3$ (рис. 32). В $t/T_{oe} > 20-30$ начинается захват ионов (рис. 38), энергия ионов растёт (рис. 36), амплитуда волны продолжает падать (рис. 32, 37), но в $t/T_{oe} > 60$ устанавливается на примерно постоянном уровне (рис. 32), что соответствует установлению нелинейной ионно-звуковой волны (рис. 38).

Серия 6. $E_o = 13,6; \tilde{n}/n_o = 0,9$. Случаи 11-1, 11-2 (ленгмюровская волна, $M/m = 10^{10}, 10^2$), 12-1, 12-2 (волна БГК, $M/m = 10^{10}, 10^2$). Кривые, описывающие случаи серии 6, приведены на рис. 39-52.

В случае очень большого возмущения плотности $\tilde{n}/n_o = 0,9$, рассмотренного в серии 6, развитие ленгмюровской волны и волны БГК в плазме с подвижными ионами (случаи 11-2, 12-2) практически не отличается от случаев 11-1, 12-1 в плазме с неподвижными ионами. Описание развития волны БГК в случае 12-1 приведено в работе [3], случай 1-5.

И в случае 11-2, и в случае 12-2 уже в первый период T_{oe} возбуждается большое число гармоник конверсии $N = N_e \pm \beta N_i$, $\beta = 1, 2, 3, \dots$ вплоть до $\beta = 8$ — $N = -23$ и 25 (рис. 39, 41). Возбуждение коротковолновых гармоник приводит к захвату ими электронов плазмы уже в $t/T_{oe} \leq 1$ и к развитию сильной стохастической неустойчивости (рис. 47, 48). По максимальным скоростям электронов в $t/T_{oe} \sim 20$ ($V_{max}/V_T \sim 3,9$, $V_{min}/V_T \sim -4,6$ в случае 11-2 и $V_{max}/V_T \sim 4,7$, $V_{min}/V_T \sim -5,5$ в случае 12-2) можно сделать вывод, что сильная стохастическая неустойчивость развивается в районе областей захвата гармоник $N \geq 10$, $N \geq |-8|$ в обоих случаях.

Ускорение электронов при развитии сильной стохастической неустойчивости приводит к затуханию поля и поглощению его энергии электронами плазмы (рис. 40, 42). К $t/T_{oe} \sim 5-7$ поле и гармоники конверсии практически полностью затухают, причём случай 11-2 (ленгмюровская волна) и случай 12-2 (волна БГК) почти не отличаются (рис. 39-41, 40-42). Это видно и по модуляции поля (рис. 43-44). Из рис. 43, 44 видно, что глубина впадин в обоих случаях не растёт, то есть модуляционная неустойчивость не играет роли.

Однако, случай 12-2 всё-таки отличается от случая 11-2 из-за перестройки распределения b -электронов (рис. 48). В первые периоды T_{oe} этот процесс не играет существенной роли, так как затухание поля идёт быстрее, чем передача энергии b -электронов в волну, так что ΔW_b до $t/T_{oe} \sim 2$ возрастает незначительно (рис. 42), поле затухает и волна БГК разрушается (рис. 44). Но перестройка распределения b -электронов продолжается (рис. 48) и в $t/T_{oe} \sim 30-40$ приводит к восстановлению волны БГК (рис. 49, 51). Из рис. 50 видно, что в это время растут потери b -электронов ΔW_b , а также поле и ΔW_e . Однако, конверсия снова приводит к затуханию поля и в $t/T_{oe} > 50-60$ оно окончательно затухает и волна БГК разрушается (рис. 48, 49, 50, 51).

Параллельно с развитием основной волны в случаях 11-2 и 12-2 развивается ионно-звуковая волна. Её развитие практически одинаково в случаях 11-2 и 12-2 и не отличается от случая, когда задана одна ионно-звуковая волна. По фазовым плоскостям ионов (рис. 52) и распределению возмущения плотности $\tilde{n}(x)$ (рис. 43, 44, 51) видно, что волна быстро укрупняется. Это приводит к появлению гармоник $N_i = 6; 9$ и уменьшению амплитуды волны $N_i = 3$ (рис. 45, 46). При укрупнении волны ионы поглощают энергию электронов — в $t/T_{oe} > 5$ ΔW_i растёт, а ΔW_e падает (рис. 40, 42, 50). Этот эффект, подробно рассмотренный в работе [10], обусловлен тем, что ионы поглощают энергию поля ионно-звуковой волны, а это поле формируется за счет теплового движения электронов. Отметим, что такой же эффект наблюдается в случае 9-2 (рис. 26), а в случае 10-2 (рис. 28) он скрыт ростом ΔW_e из-за роста ΔW_b .

В случаях 11-2, 12-2 в $t/T_{oe} > 20$ начинается захват ионов, причём захватывается значительное число ионов, так что энергия ионов заметно возрастает (рис. 50), а амплитуда волны падает (рис. 45, 46). В $t/T_{oe} > 50$ амплитуда волны устанавливается на примерно постоянном уровне. По фазовым плоскостям ионов (рис. 52) в $t/T_{oe} > 40 - 60$ видно формирование фронтов скорости, а по $\tilde{n}(x)$ (рис. 51) — формирование фронтов плотности. Ранее было показано, что на фронте нелинейной ионно-звуковой волны формируется двойной электрический слой [11]. Захват ионов в двойных слоях приводит к образованию структур типа ion-holes (рис. 52 $t/T_{oe} \sim 80$) и развитию ионно-звуковой турбулентности (рис. 52 $t/T_{oe} \sim 100$).

В работе [1] и настоящей работе исследовано развитие волны БГК с параметрами $\lambda/r_d = 200$, $E_o^2/8\pi n_o T \sim 0,06$ при взаимодействии с ионно-звуковой волной с параметрами $N_i = \lambda/\lambda_i = 3$, $\tilde{n}/n_o \sim 0,01 \div 0,1$ [1] и $\tilde{n}/n_o \sim 0,3 \div 0,9$. В работе [1] показано, что при малых амплитудах ионно-звуковой волны $\tilde{n}/n_o \leq 0,1$ конверсия волны БГК подавлена, модуляционная неустойчивость практически не играет роли и волна БГК устойчива.

С ростом амплитуды ионно-звуковой волны роль конверсии возрастает. Кроме того, становится существенным процесс перестройки распределения b -электронов на фазовой плоскости, обусловленный уменьшением средней фазовой скорости волны БГК [2]. Этот процесс приводит к росту амплитуды волны БГК и вследствие этого к росту скорости конверсии.

При $\tilde{n}/n_o \sim 0,3$ модуляция поля волны БГК гармониками конверсии стимулирует развитие модуляционной неустойчивости, которая приводит к коллапсу, затуханию поля и разрушению волны БГК.

При $\tilde{n}/n_o \geq 0,6$ модуляционная неустойчивость не успевает развиваться, так как конверсия за несколько плазменных периодов приводит к возбуждению большого числа гармоник. В районе областей захвата коротковолновых гармоник развивается сильная стохастическая неустойчивость движения электронов плазмы, что приводит к затуханию поля и разрушению волны БГК.

Развитие ленгмюровской волны при $\tilde{n}/n_o \geq 0,3$ определяется конверсией и сильной стохастической неустойчивостью, что приводит к затуханию волны. При больших $\tilde{n}/n_o > 0,6$ развитие конверсии волны БГК близко к случаю ленгмюровской волны. Особенностью волны БГК являются вторичные всплески поля, связанные с перестройкой распределения захваченных электронов, в результате чего волна БГК окончательно затухает за более длительное время, чем ленгмюровская волна.

Список литературы

- [1] *Г.А.Артин, Н.С.Бучельникова.* Волна Бернштейна-Грина-Крускала. Конверсия и модуляционная неустойчивость. I. — Препринт ИЯФ N 97-28, 1997.
- [2] *Н.С.Бучельникова, Б.Н.Лазеев.* Конверсия волны Бернштейна-Грина-Крускала на возмущении плотности. I, II, III. — Препринты ИЯФ N 94-48, N 94-49, N 94-50, 1994.
- [3] *Н.С.Бучельникова, Б.Н.Лазеев.* Конверсия волны Бернштейна-Грина-Крускала на возмущении плотности. IV. — Препринт ИЯФ N 94-51, 1994.
- [4] *P.K.Kaw, A.T.Lin, J.M. Dawson* — *Phys. Fluids* 16, 1967, 1973.
- [5] *N.S.Buchelnikova, E.P.Matochkin* — *Physica Scripta* 24, 566, 1981.
- [6] *Н.С.Бучельникова, Е.П.Маточкин.* Конверсия и неустойчивость ленгмюровских волн. — Препринт ИЯФ N 81-40, 1981.
- [7] *Н.С.Бучельникова, Е.П.Маточкин.* — Препринты ИЯФ N 80-192, 1980; N 81-04, 1981; N 81-43, 1981; N 81-88, 1981; N 81-89, 1981; N 82-53, 1982.
- [8] *Н.С.Бучельникова, Е.П.Маточкин.* — Препринты ИЯФ N 84-149, N 84-150, 1984; Взаимодействие электромагнитных излучений с плазмой, стр. 221, Ташкент, 1985; *Phys. Letters* 112A, 330, 1985.
- [9] *Е.М.Лифшиц, Л.П.Питаевский.* Физическая кинетика, стр. 171, Москва, Наука, 1979.
- [10] *Н.С.Бучельникова, Е.П.Маточкин.* Ионно-звуковые волны большой амплитуды. — Препринт ИЯФ N 82-51, 1982.
- [11] *Н.С.Бучельникова, Е.П.Маточкин.* Развитие ионного возмущения. Двойные слои и стохастические эффекты. — Препринт ИЯФ N 90-24, 1990.

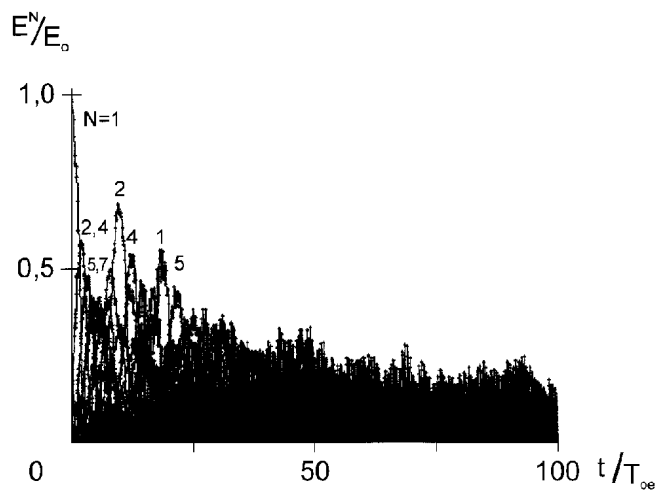


Рис. 1: Зависимость от времени амплитуды ленгмюровской волны $N = 1$ и гармоник $N = 2 \div 30$. Случай 7-1. $E_0 = 13,6$; $M/m = 10^{10}$.

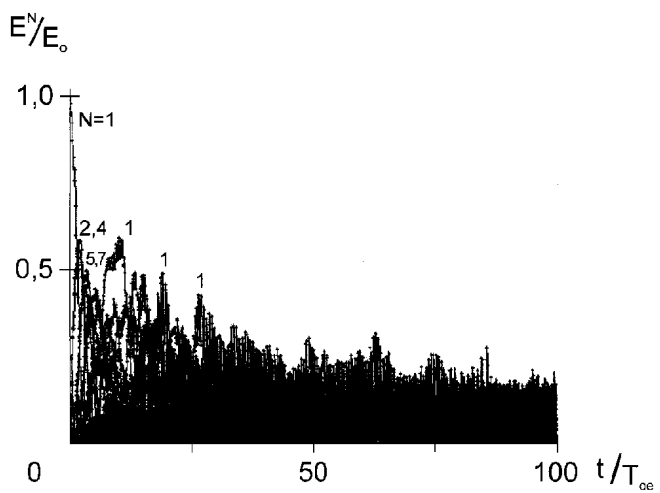


Рис. 2: Зависимость от времени амплитуды ленгмюровской волны $N = 1$ и гармоник $N = 2 \div 30$. Случай 7-2. $E_0 = 13,6$; $M/m = 10^2$.

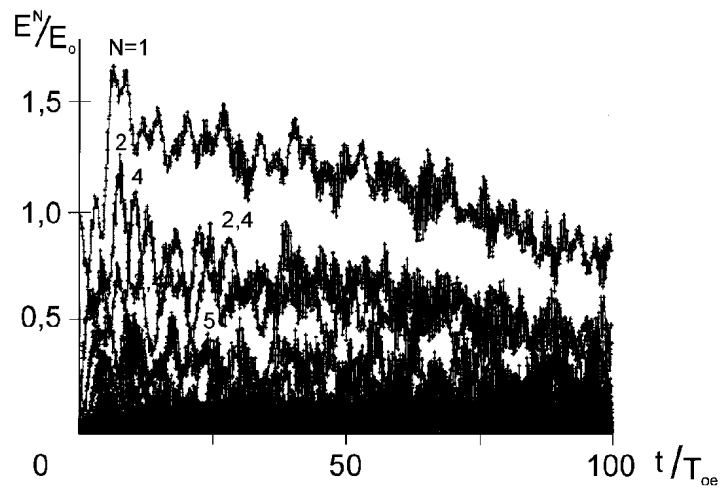


Рис. 3: Зависимость от времени амплитуды волны БГК $N = 1$ и гармоник $N = 2 \div 30$.
Случай 8-1. $E_o = 13,6$; $M/m = 10^{10}$.

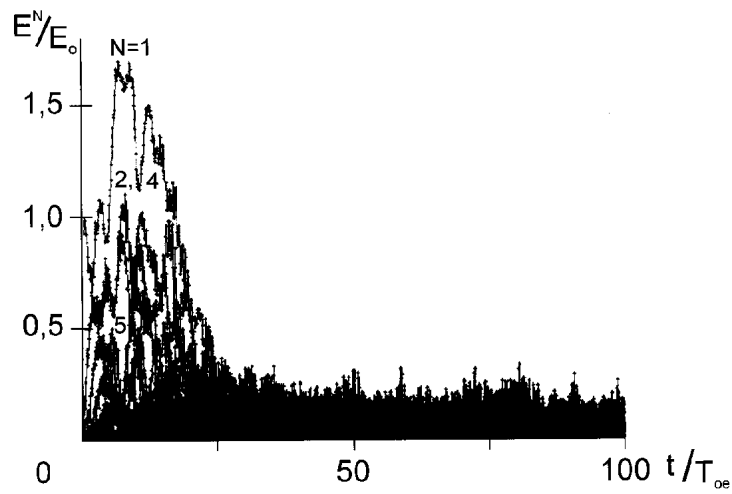


Рис. 4: Зависимость от времени амплитуды волны БГК $N = 1$ и гармоник $N = 2 \div 30$.
Случай 8-2. $E_o = 13,6$; $M/m = 10^2$.

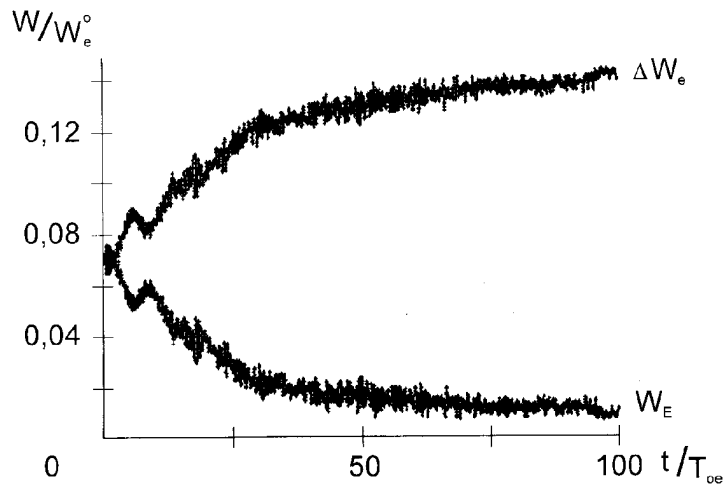


Рис. 5: Зависимость от времени энергии поля W_E и энергии электронов плазмы $\Delta W_e = W_e - W_e^0$. Случай 7-1.

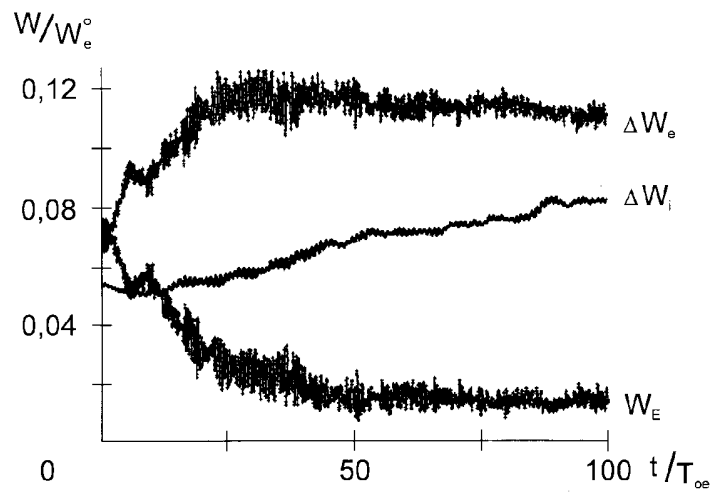


Рис. 6: Зависимость от времени энергии поля W_E и энергии электронов и ионов плазмы $\Delta W_e, \Delta W_i$. Случай 7-2.

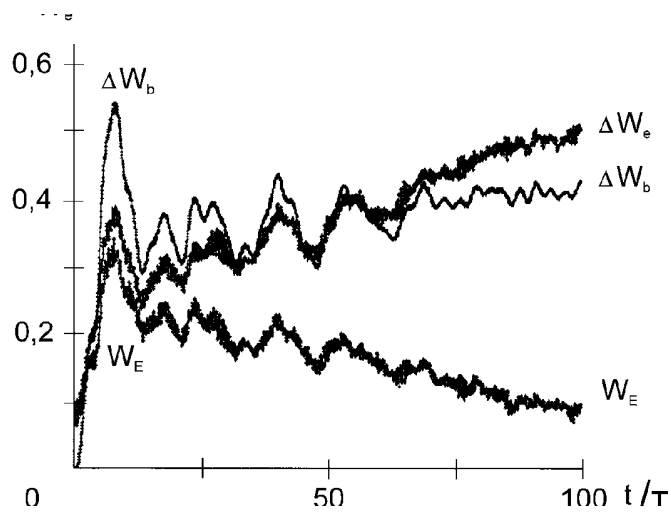


Рис. 7: Зависимость от времени энергии поля W_E , энергии электронов плазмы ΔW_e и потерь энергии b -электронов $\Delta W_b = -(W_b - W_b^0)$. Случай 8-1.

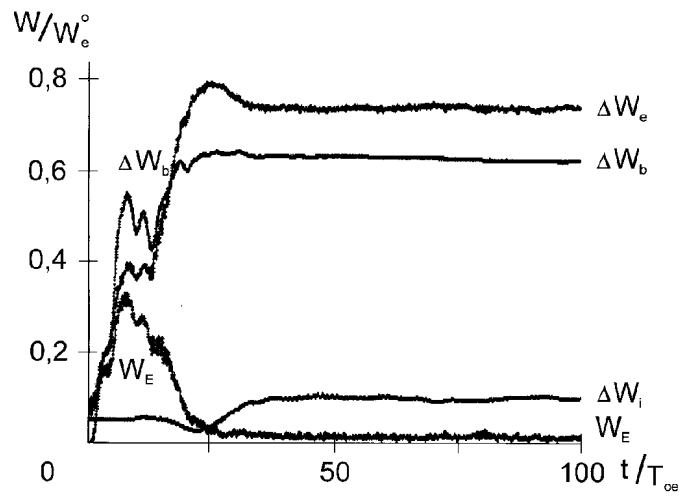


Рис. 8: Зависимость от времени энергии поля W_E , энергии электронов и ионов плазмы ΔW_e , ΔW_i и потерь энергии b -электронов ΔW_b . Случай 8-2.

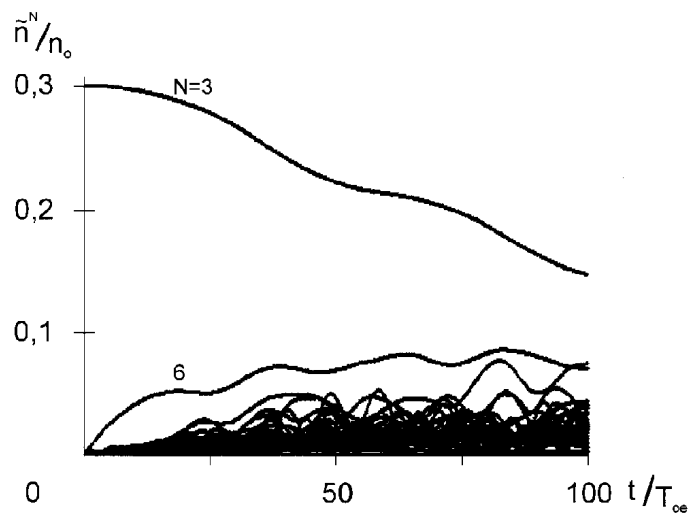


Рис. 9: Зависимость от времени амплитуды гармоник плотности ионов $N_i = 1 \div 30$.
Случай 7-2.

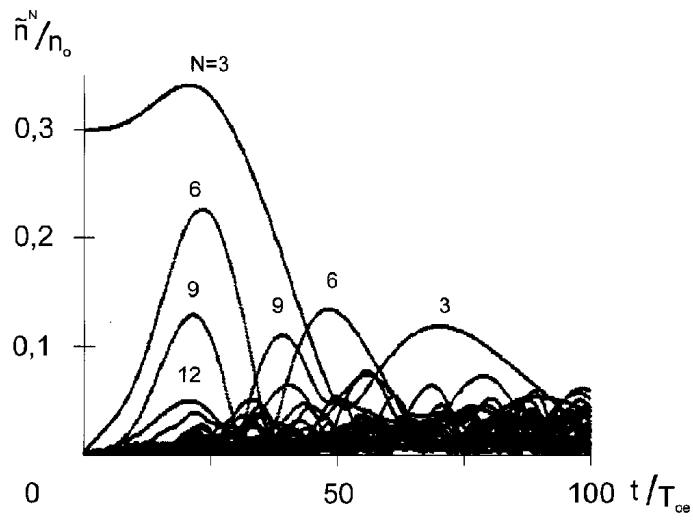


Рис. 10: Зависимость от времени амплитуды гармоник плотности ионов $N_i = 1 \div 30$.
Случай 8-2.

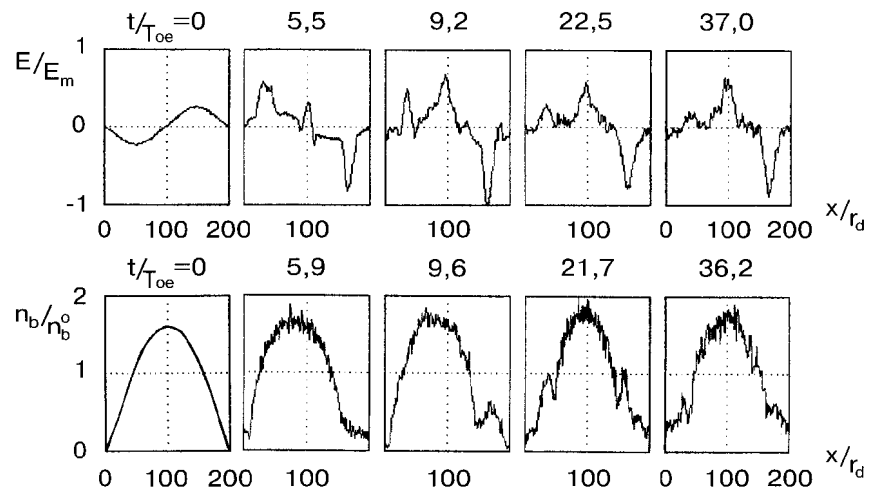


Рис. 11: Распределение поля $E(x)$ и плотности b -электронов $n_b(x)$. Случай 8-1.
 $E_m/E_o = 4,36$; $E_o = 13,6$; $n_b^o/n_o = 5 \cdot 10^{-3}$.

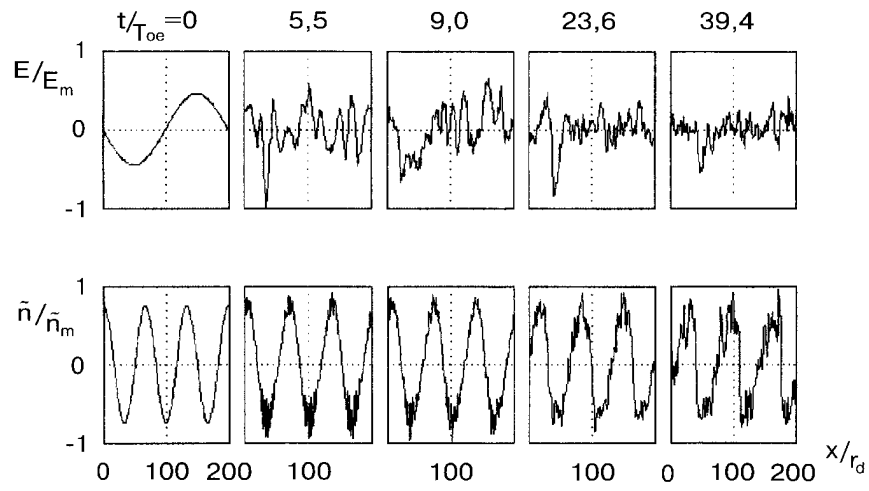


Рис. 12: Распределение поля $E(x)$ и возмущения плотности плазмы $\tilde{n}(x)$. Случай 7-2. $E_m/E_o = 2,20$; $E_o = 13,6$; $\tilde{n}_m/n_o = 0,40$.

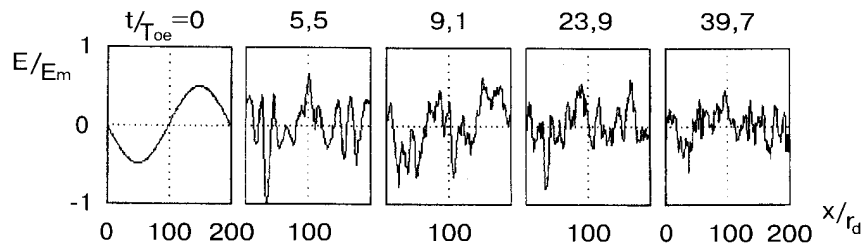


Рис. 13: Распределение поля $E(x)$. Случай 7-1. $E_m/E_o = 2,02$; $E_o = 13,6$.

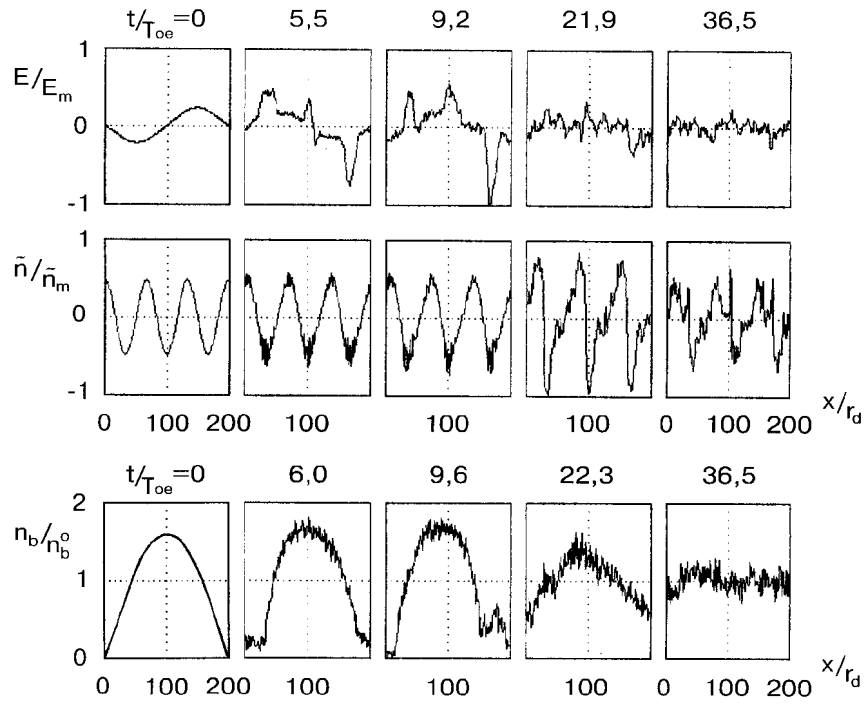


Рис. 14: Распределение поля $E(x)$, возмущения плотности плазмы $\tilde{n}(x)$ и плотности b -электронов $n_b(x)$. Случай 8-2. $E_m/E_o = 4,74$; $E_o = 13,6$; $\tilde{n}_m/n_o = 0,62$; $n_b^o/n_o = 5 \cdot 10^{-3}$.

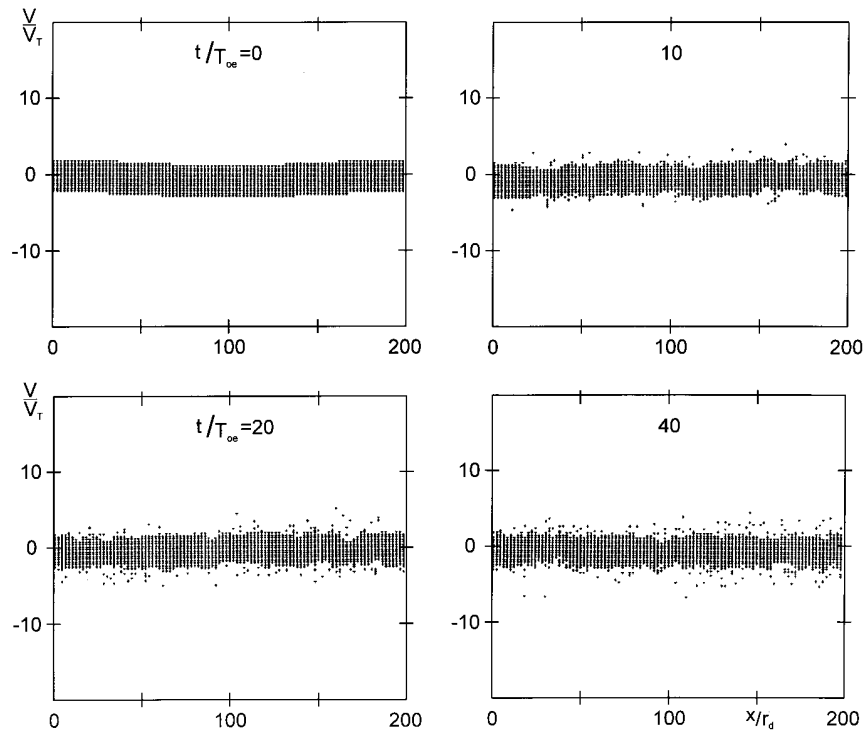


Рис. 15: Фазовые плоскости электронов. Случай 7-1.

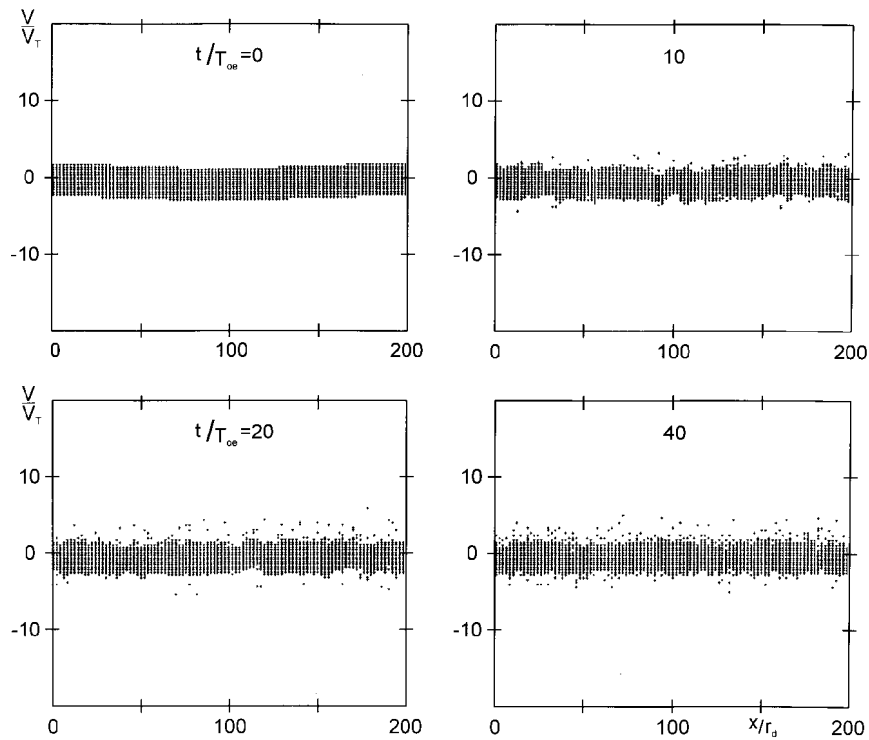


Рис. 16: Фазовые плоскости электронов. Случай 7-2.

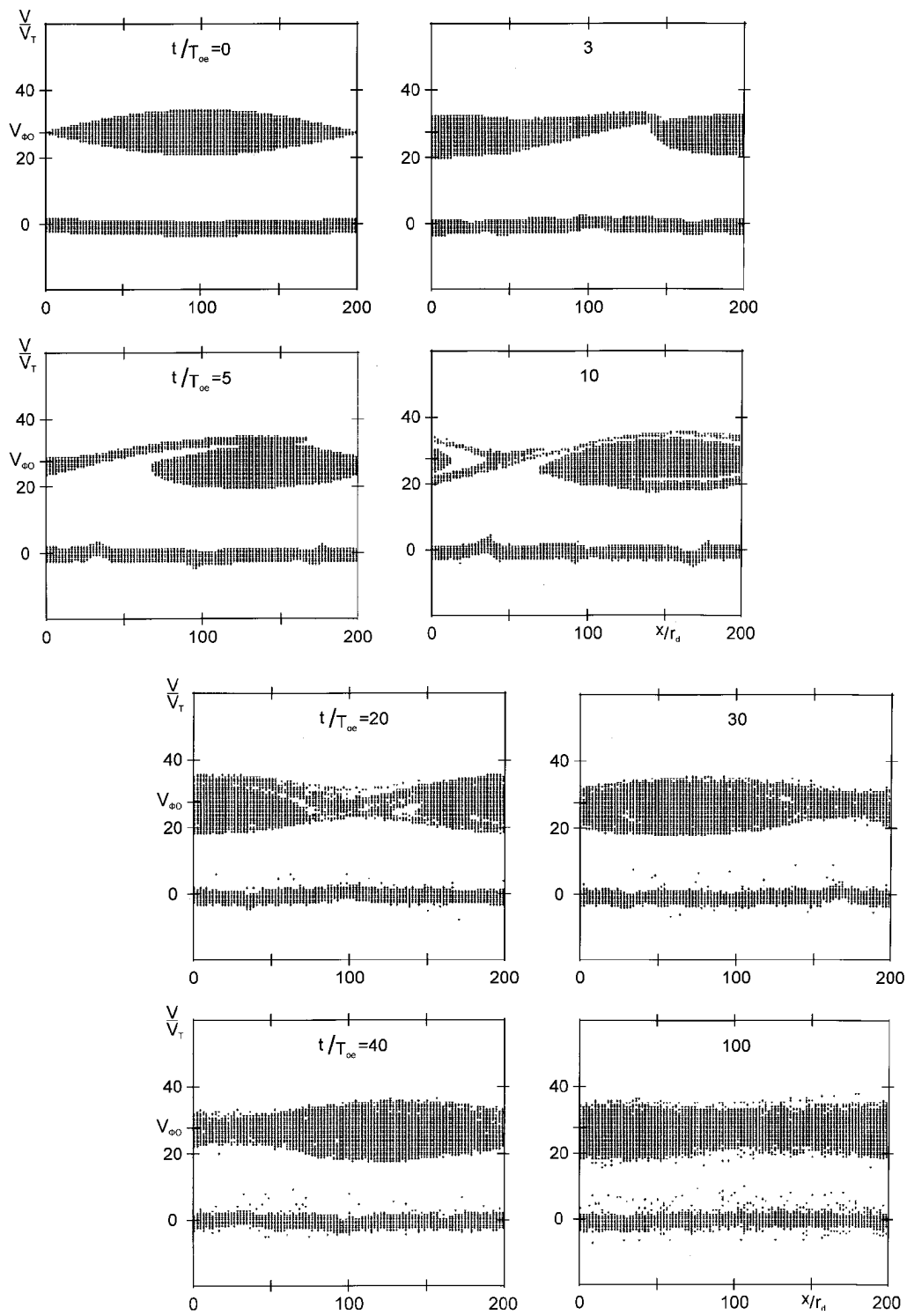


Рис. 17: Фазовые плоскости электронов. Случай 8-1.

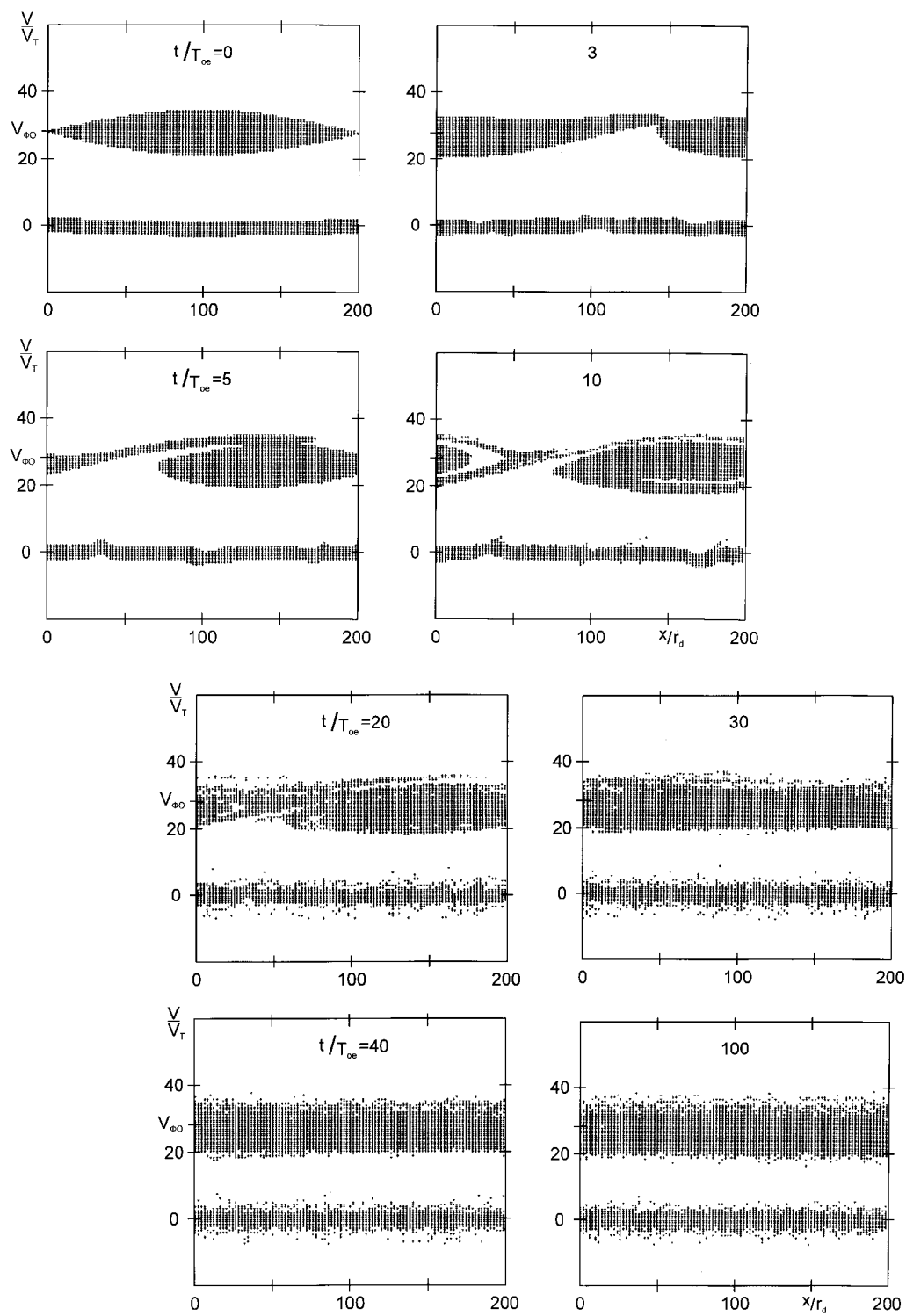


Рис. 18: Фазовые плоскости электронов. Случай 8-2.

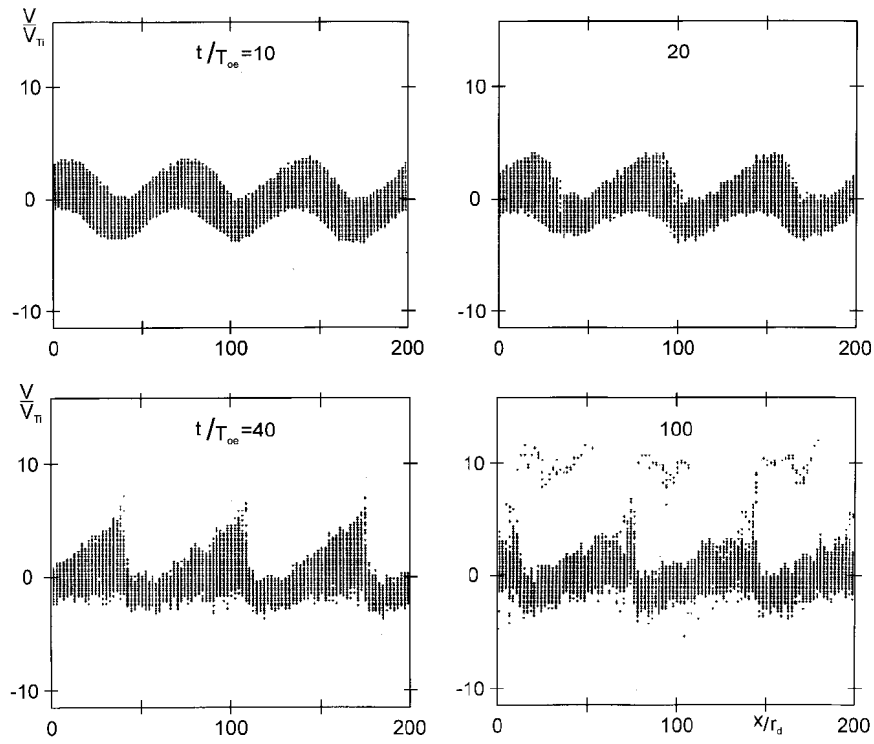


Рис. 19: Фазовые плоскости ионов. Случай 7-2.

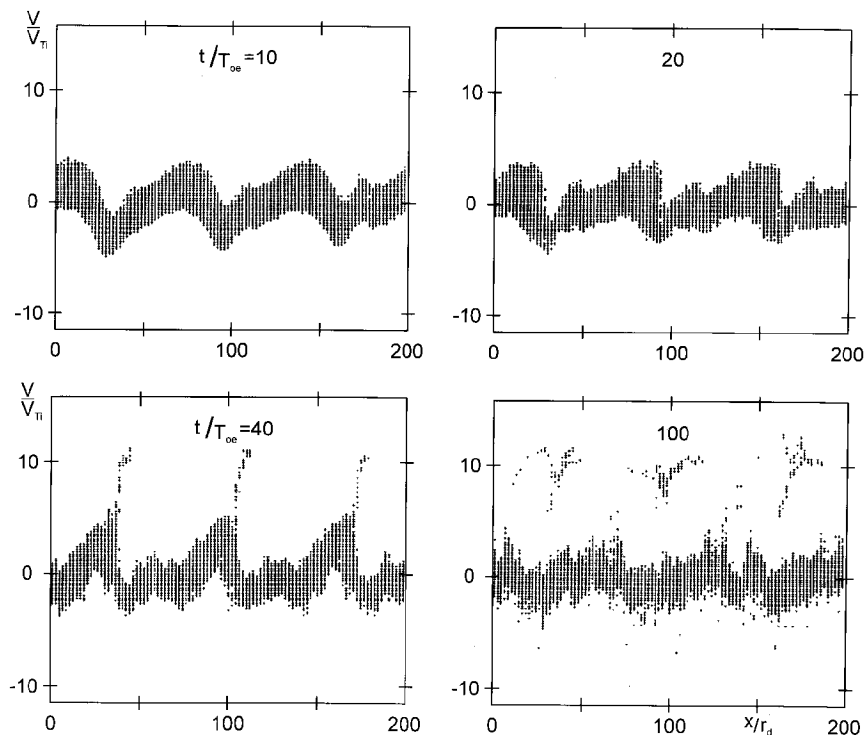


Рис. 20: Фазовые плоскости ионов. Случай 8-2.

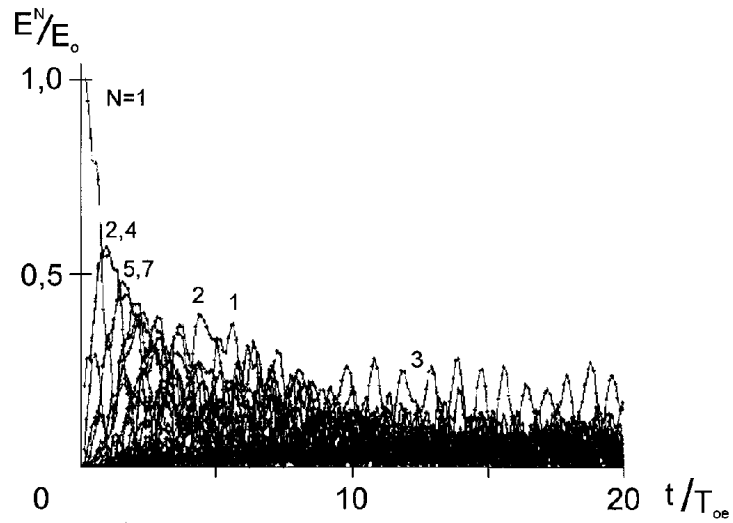


Рис. 21: Зависимость от времени амплитуды ленгмюровской волны $N = 1$ и гармоник $N = 2 \div 30$. Случай 9-1. $E_o = 13,6$; $M/m = 10^{10}$.

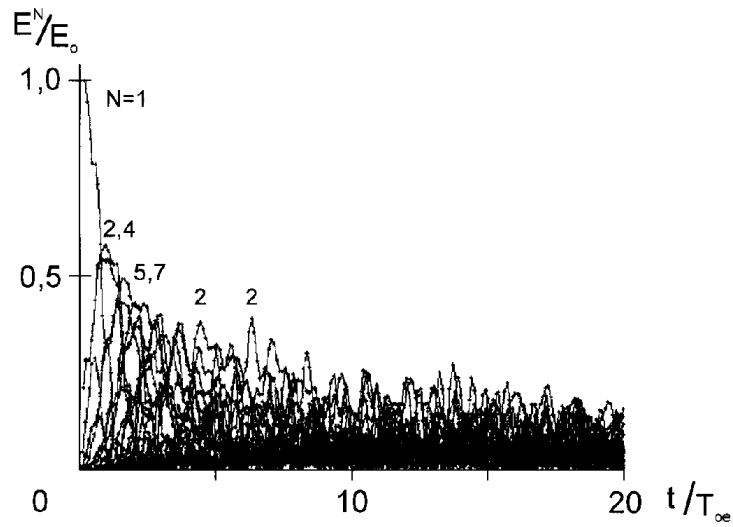


Рис. 22: Зависимость от времени амплитуды ленгмюровской волны $N = 1$ и гармоник $N = 2 \div 30$. Случай 9-2. $E_o = 13,6$; $M/m = 10^2$.

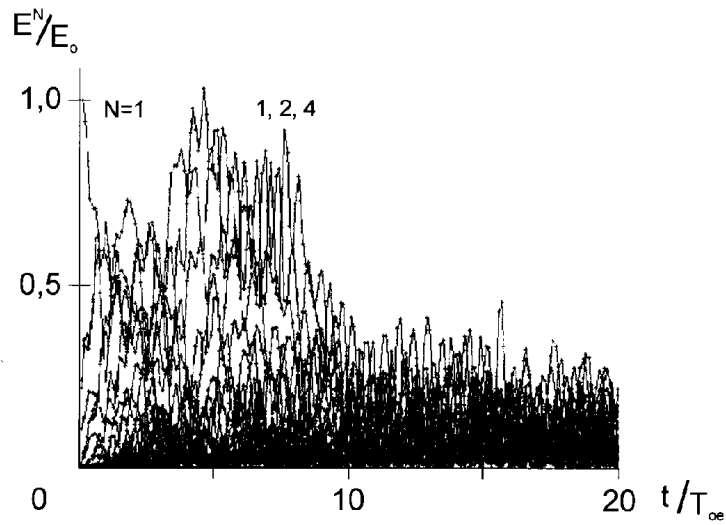


Рис. 23: Зависимость от времени амплитуды волны БГК $N = 1$ и гармоник $N = 2 \div 30$. Случай 10-1. $E_0 = 13,6$; $M/m = 10^{10}$.

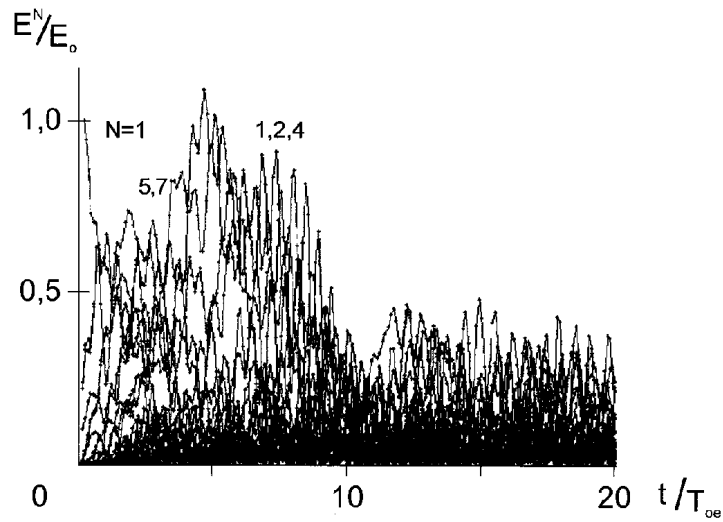


Рис. 24: Зависимость от времени амплитуды волны БГК $N = 1$ и гармоник $N = 2 \div 30$. Случай 10-2. $E_0 = 13,6$; $M/m = 10^2$.

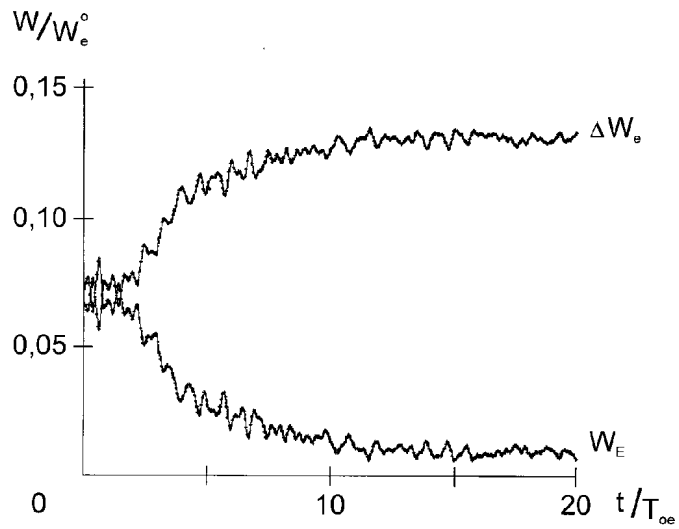


Рис. 25: Зависимость от времени энергии поля W_E и энергии электронов плазмы ΔW_e . Случай 9-1.

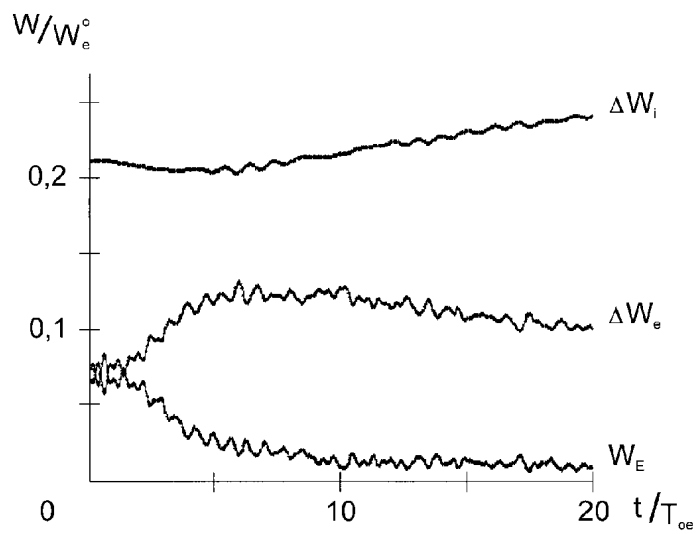


Рис. 26: Зависимость от времени энергии поля W_E и энергии электронов и ионов плазмы ΔW_e , ΔW_i . Случай 9-2.

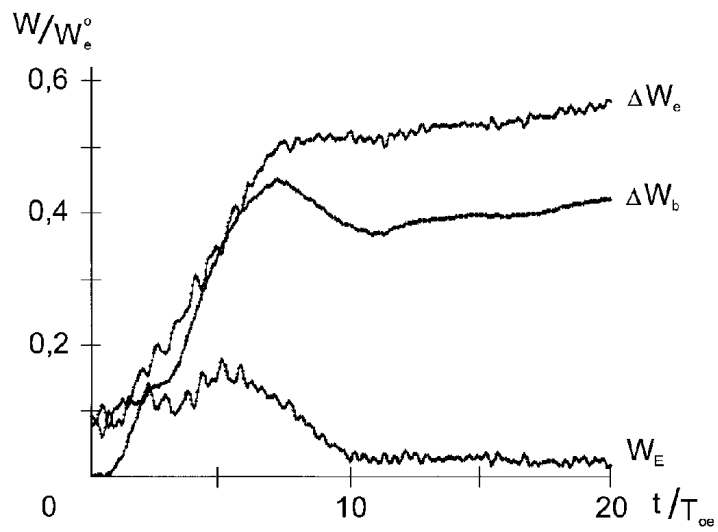


Рис. 27: Зависимость от времени энергии поля W_E , энергии электронов плазмы ΔW_e и потерь энергии b -электронов ΔW_b . Случай 10-1.

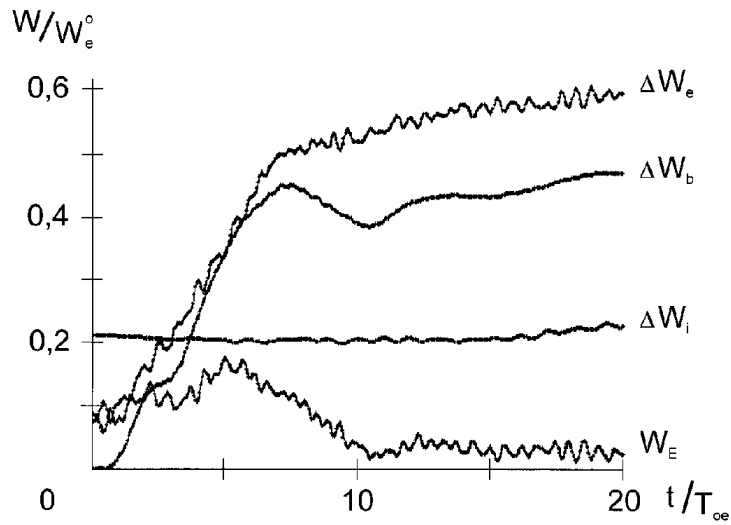


Рис. 28: Зависимость от времени энергии поля W_E , энергии электронов и ионов плазмы ΔW_e , ΔW_i и потерь энергии b -электронов ΔW_b . Случай 10-2.

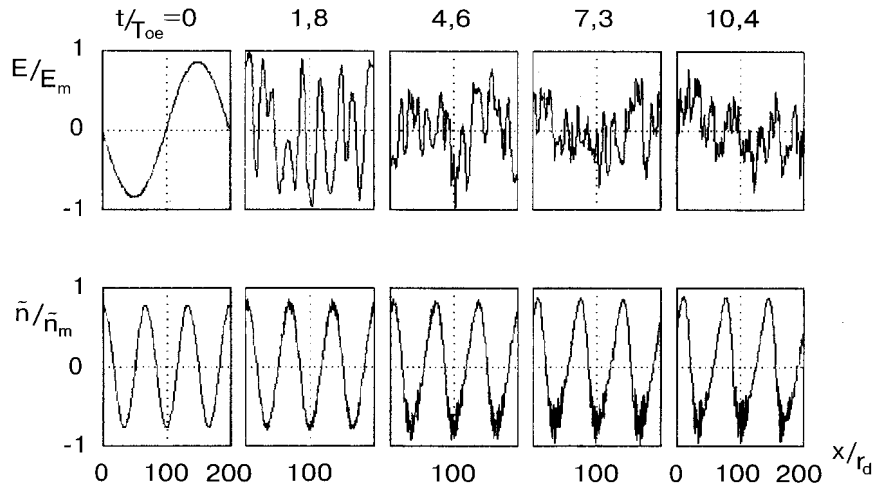


Рис. 29: Распределение поля $E(x)$ и возмущения плотности плазмы $\tilde{n}(x)$. Случай 9-2. $E_m/E_o = 1,16$; $E_o = 13,6$; $\tilde{n}_m/n_o = 0,77$.

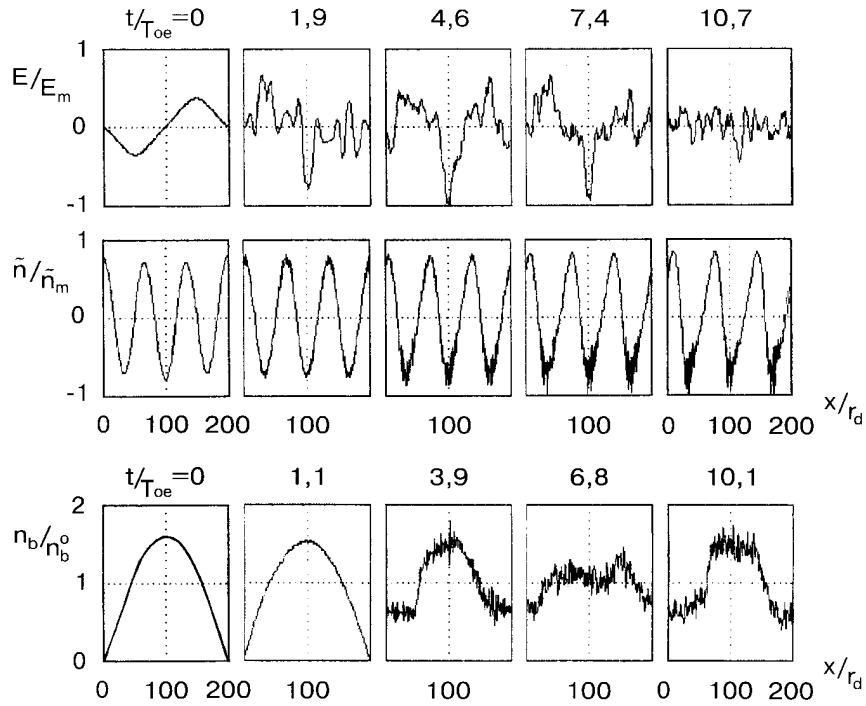


Рис. 30: Распределение поля $E(x)$, возмущения плотности плазмы $\tilde{n}(x)$ и плотности b-электронов $n_b(x)$. Случай 10-2. $E_m/E_o = 2,96$; $E_o = 13,6$; $\tilde{n}_m/n_o = 0,81$; $n_b^o/n_o = 5 \cdot 10^{-3}$.

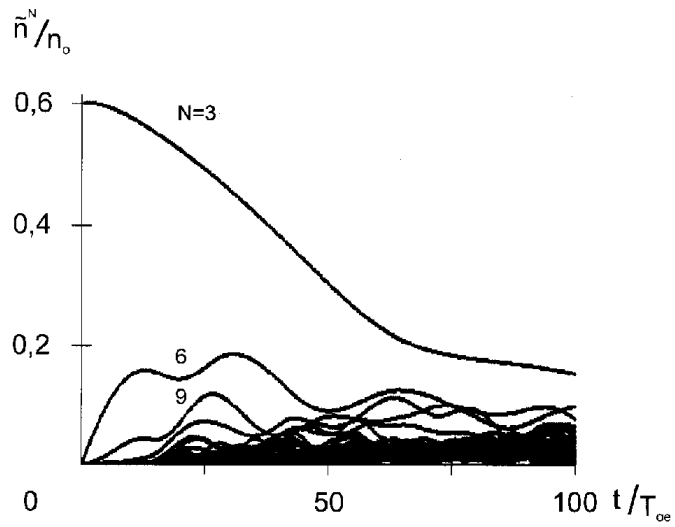


Рис. 31: Зависимость от времени амплитуды гармоник плотности ионов $N_i = 1 \div 30$.
Случай 9-2.

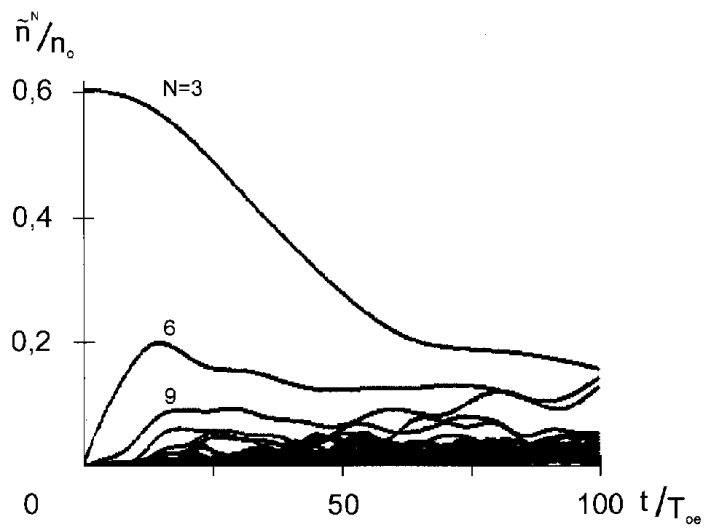


Рис. 32: Зависимость от времени амплитуды гармоник плотности ионов $N_i = 1 \div 30$.
Случай 10-2.

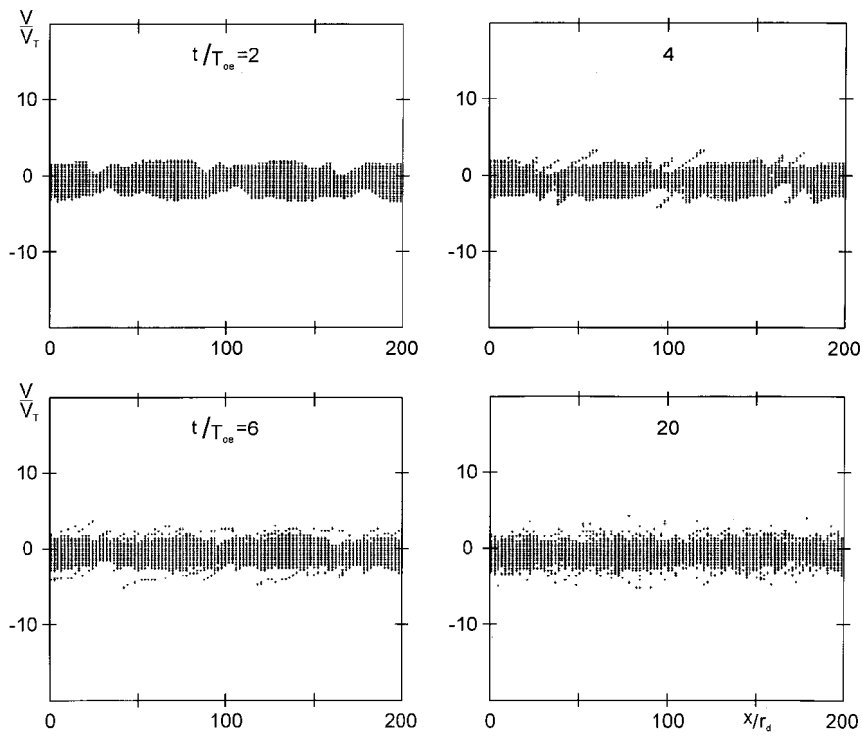


Рис. 33: Фазовые плоскости электронов. Случай 9-2.

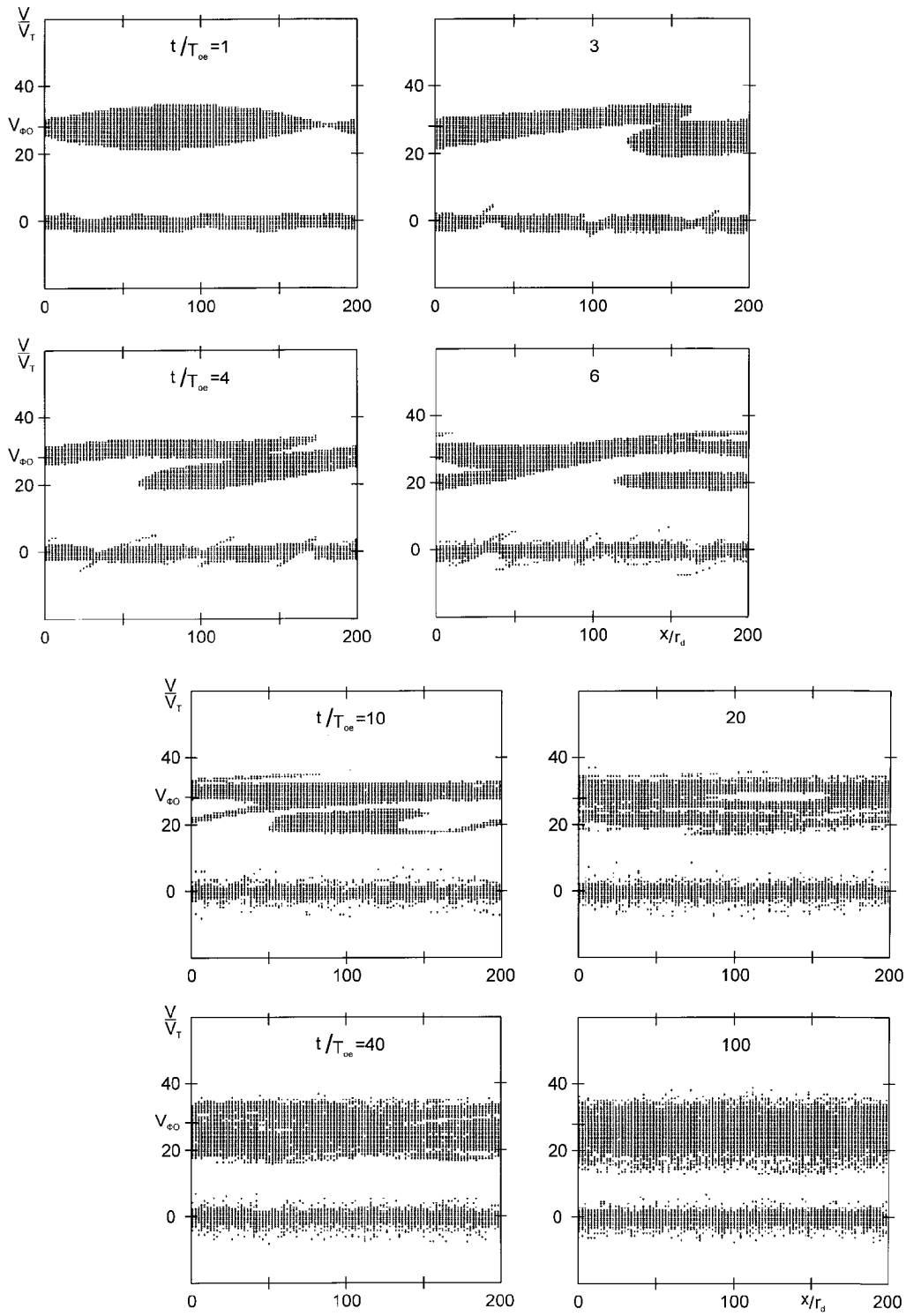


Рис. 34: Фазовые плоскости электронов. Случай 10-2.

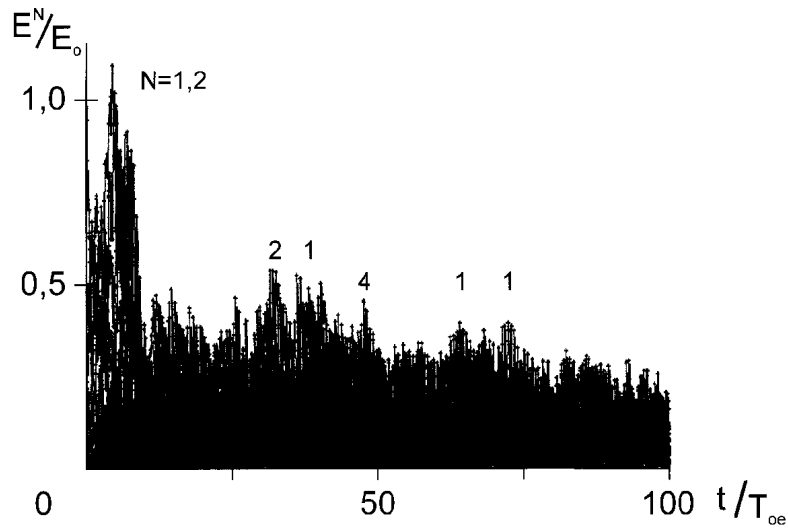


Рис. 35: Зависимость от времени амплитуды волны БГК $N = 1$ и гармоник $N = 2 \div 30$. Случай 10-2.

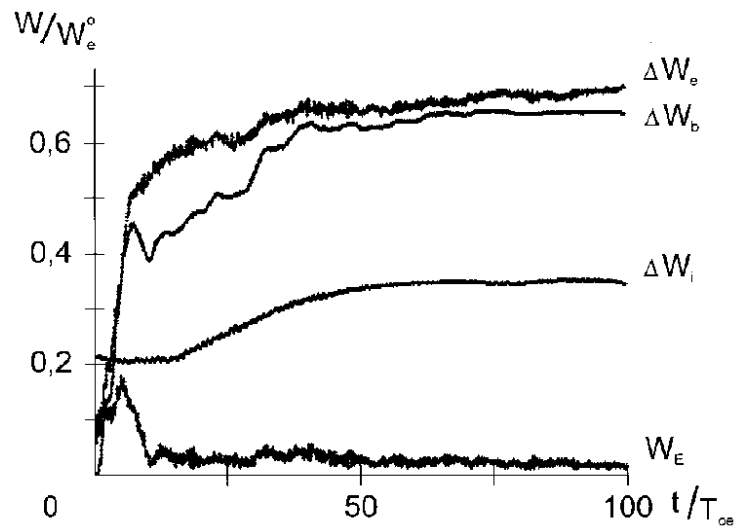


Рис. 36: Зависимость от времени энергии поля W_E , энергии электронов и ионов плазмы ΔW_e , ΔW_i и потерь энергии b -электронов ΔW_b . Случай 10-2.

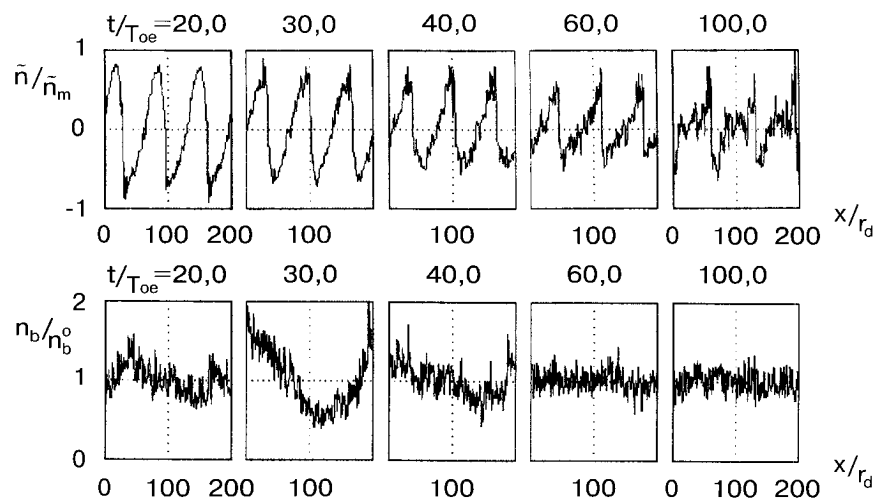


Рис. 37: Распределение возмущения плотности плазмы $\tilde{n}(x)$ и плотности b-электронов $n_b(x)$. Случай 10-2. $\tilde{n}_m/n_o = 0,77$; $n_b^o/n_o = 5 \cdot 10^{-3}$.

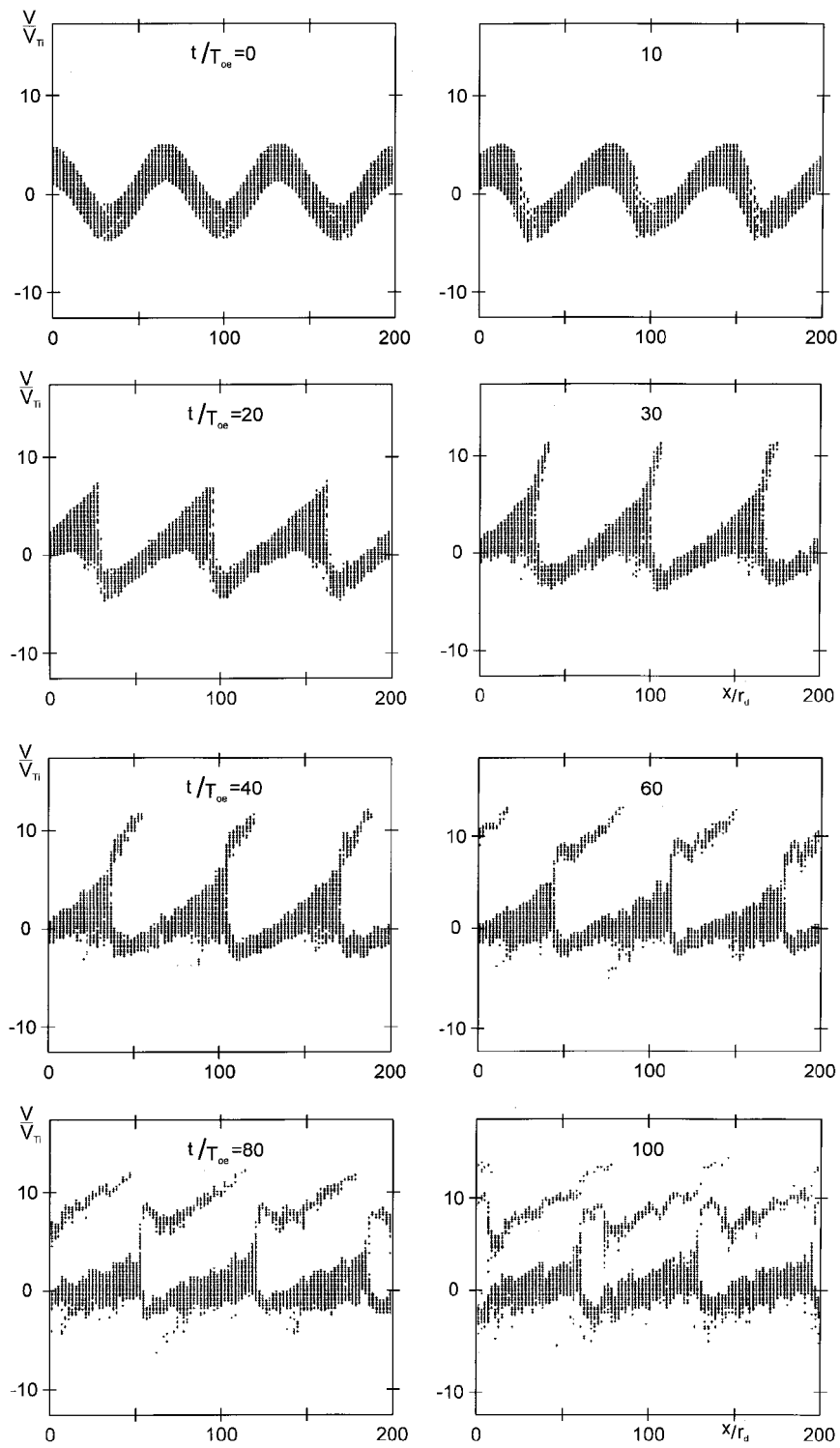


Рис. 38: Фазовые плоскости ионов. Случай 10-2.

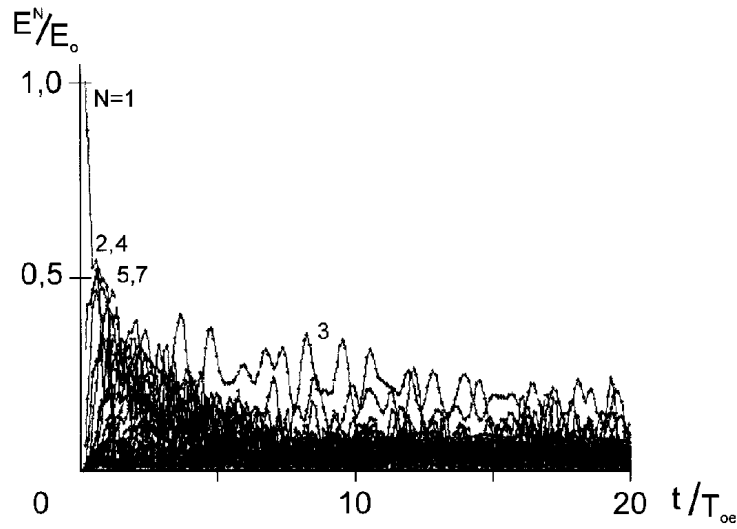


Рис. 39: Зависимость от времени амплитуды ленгмюровской волны $N = 1$ и гармоник $N = 2 \div 30$. Случай 11-2. $E_0 = 13,6$; $M/m = 10^2$.

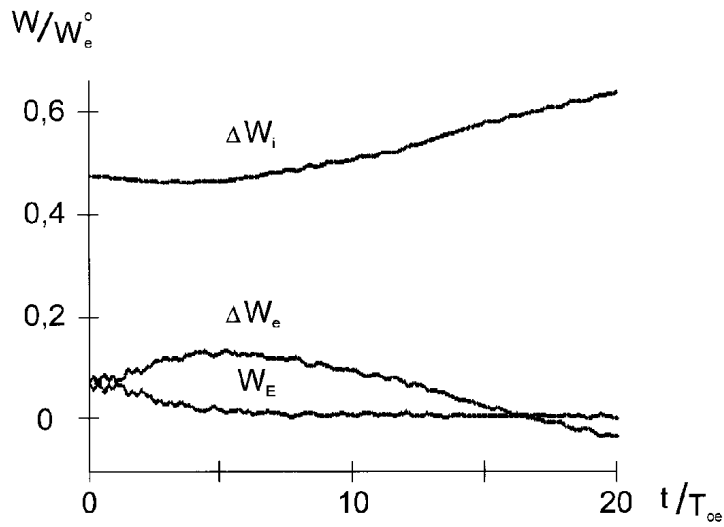


Рис. 40: Зависимость от времени энергии поля W_E и энергии электронов и ионов плазмы ΔW_e , ΔW_i . Случай 11-2.

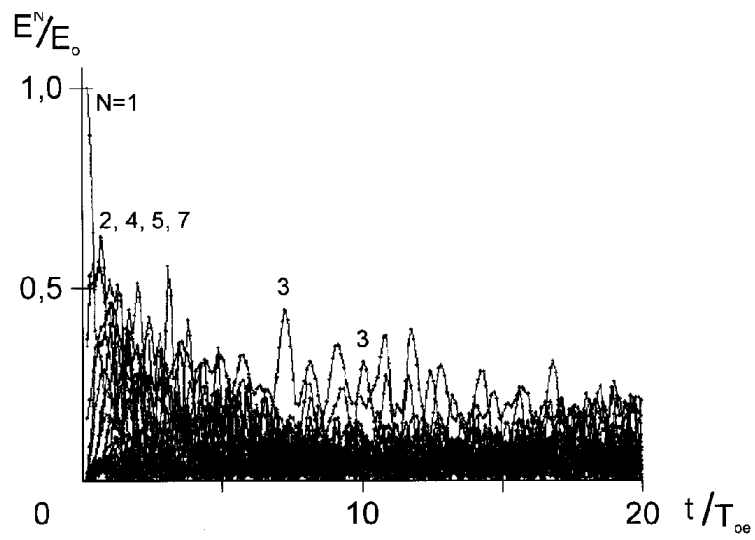


Рис. 41: Зависимость от времени амплитуды волны БГК $N = 1$ и гармоник $N = 2 \div 30$. Случай 12-2. $E_0 = 13,6$; $M/m = 10^2$.

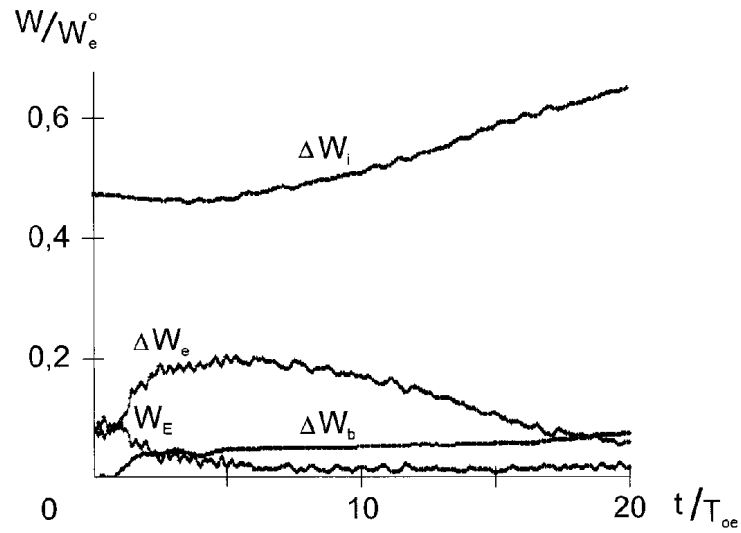


Рис. 42: Зависимость от времени энергии поля W_E , энергии электронов и ионов плазмы ΔW_e , ΔW_i и потерь энергии b -электронов ΔW_b . Случай 12-2.

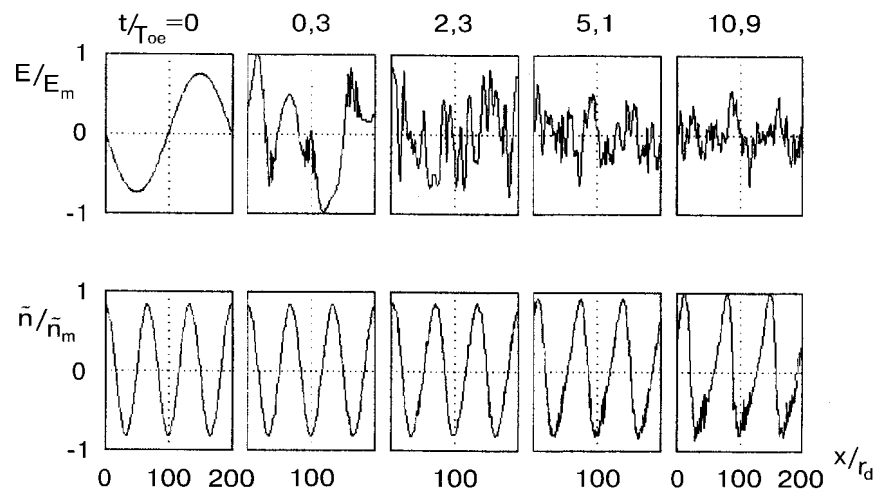


Рис. 43: Распределение поля $E(x)$ и возмущения плотности плазмы $\tilde{n}(x)$. Случай 11-2.
 $E_m/E_o = 1,32$; $E_o = 13,6$; $\tilde{n}_m/n_o = 1,1$.

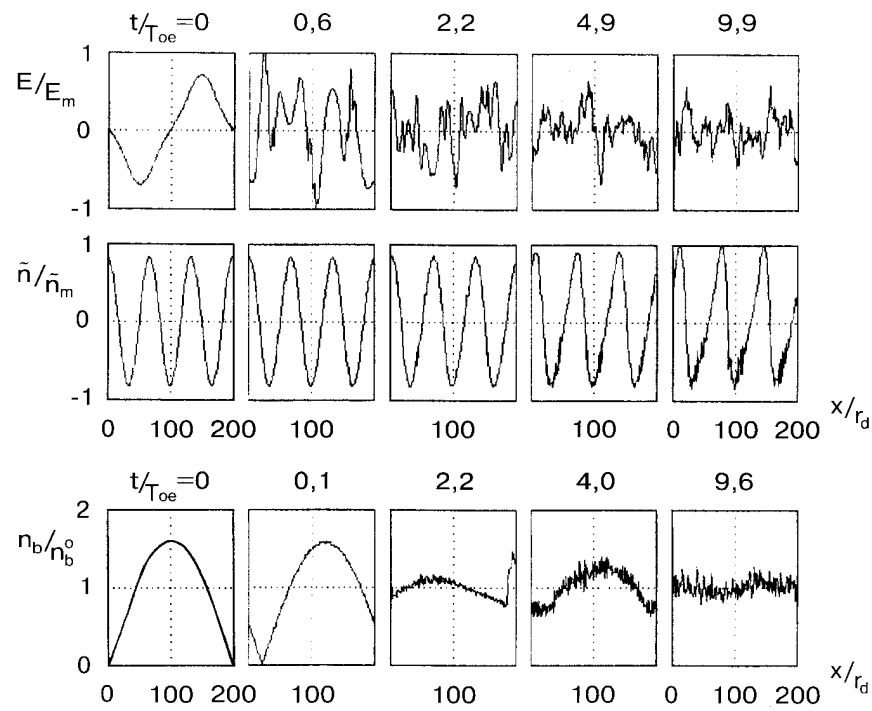


Рис. 44: Распределение поля $E(x)$, возмущения плотности плазмы $\tilde{n}(x)$ и плотности b -электронов $n_b(x)$. Случай 12-2. $E_m/E_o = 1,62$; $E_o = 13,6$; $\tilde{n}_m/n_o = 1,1$; $n_b^o/n_o = 5 \cdot 10^{-3}$.