

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

КОСМИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ

Том XXIII

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

3

МОСКВА · 1985

УДК 533.951.2

Е. И. Грингауз, Н. Н. Ижовкина, С. А. Пулинец,
Н. М. ШюттеО МЕХАНИЗМАХ ИЗЛУЧЕНИЯ И ТРАНСФОРМАЦИИ ВОЛН
СВИСТОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ, НАБЛЮДАВШИХСЯ
В ЭКСПЕРИМЕНТЕ С ИНЖЕКЦИЕЙ ЭЛЕКТРОННЫХ ИМПУЛЬСОВ
В ИОНОСФЕРУ («АРАКС»)

Рассматриваются механизмы излучения и трансформации волн для свистового ($\omega < \Omega_e$) диапазона частот по данным волновых измерений в управляемом эксперименте «Аракс» с электронными импульсами, искусственно инжектированными в ионосферу. Для анализа волновых механизмов и наблюдавшихся в эксперименте эффектов сильных взаимодействий волн ($\omega < \Omega_e$) и частиц (электронов) использованы данные по потокам электронов, полученные с помощью широкоугольных детекторов, установленных на ракетах, с борта которых производилась инжекция электронных импульсов, и направленных вверх (нижний порог чувствительности детекторов по энергии электронов составлял $E \sim 8$ кэВ), а также данные по волновому излучению ($\omega < \Omega_e$), полученные с помощью широкополосного приемника, установленного на отделявшемся от ракеты носовом конусе.

В управляемом эксперименте «Аракс» [1] с искусственно инжектированными электронными импульсами в околоземной космической плазме (ионосфера; магнитосфера, $L \sim 4$) были осуществлены два запуска ракет с электронным инжектором на борту. Комплекс измерительной аппаратуры и программа эксперимента описаны в [1]. На отделявшемся от ракеты носовом конусе был установлен широкополосный приемник (частотный диапазон измерений 0,1–5 МГц; измерения проводились по электрическому компоненту волн). В этой работе анализируются результаты измерений для свистового диапазона частот $\omega < \Omega_e$ ($f < f_{ce} \sim 1,3$ МГц). Волновой сигнал для этого диапазона частот был выделен с помощью широкополосного фильтра ($\Delta f \sim 300$ кГц), спектральный анализ сигнала для $\omega < \Omega_e$ производился рециркуляционным методом [2]. Для более полного рассмотрения механизмов излучения и трансформации волн привлечены данные эффектов сильных взаимодействий волн ($\omega < \Omega_e$) и частиц (электронов) [3–5]. Измерения потоков электронов ($E \geq 8$ кэВ) проводились с помощью широкоугольных детекторов (поле зрения детектора $\delta \approx \pm 45^\circ$), установленных на ракетах и направленных вверх [1].

Данные об эффектах сильных взаимодействий волна — частицы [3–5]. Результаты измерений волнового сигнала $\omega < \Omega_e$. Для запуска ракеты (15.II 1975 г.) [1], осуществленного во время фазы восстановления суббури, для серий электронных импульсов (начальная энергия электронов $E_0 \approx 27$ кэВ, сила тока $I_0 \approx 0,45$ А), инжектированных в нижнюю полусферу (начальный пич-угол электронов $\theta_0 \geq \pi/2$), в паузах между импульсами наблюдались всплески волнового излучения ($\omega < \Omega_e$) и потоков электронов ($E \geq 8$ кэВ) (рис. 1, где заштрихованные фигуры соответствуют сигналам, измеренным во время импульсов электронного инжектора, незаштрихованные — сигналам в паузах между инжектируемыми электронными импуль-

сами). При инж в первом запуске зарегистрирован

На рис. 3 пазона $\omega < \Omega_e$, п лиза. Видны яр для сигналов, и ного в одной из спектры получе наружены эффе

Результаты женному эффе

нов $E \geq 8$ кэВ, импульсов, можн для свистового циклотронного зонанское усло $\omega - \Omega_e = kv$, $\omega < \Omega_e$ ными эксперим волны распрос ное высыпание ции вниз ($\theta_0 > \pi/2$) лась $\omega \rightarrow \Omega_e$ (в ного поля), пр [6]. Для излу диапазона част ($\omega \rightarrow \Omega_e$) распоз тропии по те $\omega \rightarrow \Omega_e$ возника ковые колеба вуют в област обуславливая и эффекты сильн циклов работ импульсов вни

И ВОЛН ИХСЯ ИМПУЛЬСОВ

олн для
мерений
ами, ис-
олновых
взаимо-
нные по
детек-
гась ин-
й порог
иял $E \sim$
олучен
на от-

инжектиро-
ской плазме
пуска ракет
й аппарату-
й от ракеты
(частотный
ктрическому
измерений
овой сигнал
кополосного
, $\omega < \Omega_e$, произ-
ассмотрения
ные эффек-
нов) [3-5].
эщью широ-
ановленных

ицы [3-5].
ска ракеты
ения суббу-
электронов
полусферу
импульсами
электронов
т сигналам,
штрихован-
ми импуль-

сами). При инъекции электронных импульсов вверх ($\theta_0 < \pi/2$) (рис. 2) и в первом запуске ракеты (26.I 1975 г.) такие всплески в паузах не были зарегистрированы (запуск 26.I был осуществлен в спокойный период).

На рис. 3 представлены типичные спектры волнового сигнала для диапазона $\omega < \Omega_e$, полученные методом рециркуляционного спектрального анализа. Видны ярко выраженные максимумы на частоте $\omega \sim \Omega_e/2$ (рис. 3, а-в) для сигналов, измеренных во время импульсов. Спектр сигнала, измеренного в одной из пауз между импульсами, представлен на рис. 3, г. Такие спектры получены для серий электронных импульсов, в которых были обнаружены эффекты сильных взаимодействий волна — частицы [3-5].

Результаты анализа экспериментальных данных. Благодаря обнаруженному эффекту сильных взаимодействий волн $\omega < \Omega_e$ и потоков электро-

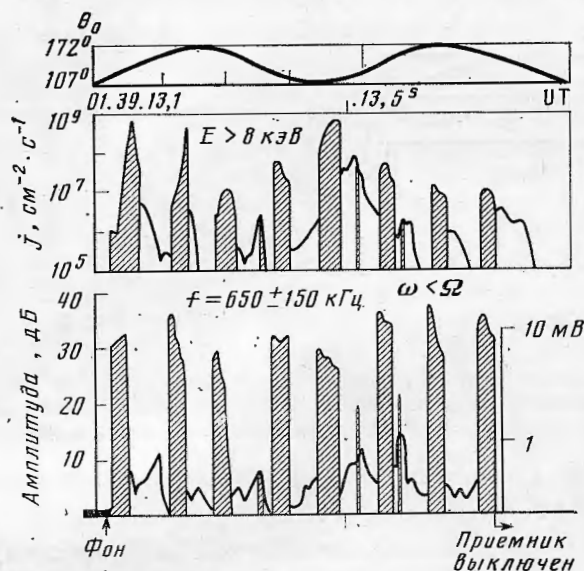


Рис. 1

нов $E \geq 8$ кэВ, наблюдавшемуся для нескольких серий электронных импульсов, можно идентифицировать основной механизм излучения волн для свистового диапазона частот для данного эксперимента — механизм циклотронного излучения волн инжектируемым электронным пучком. Резонансное условие для циклотронного механизма записывается в виде $\omega - \Omega_e = kv$, $\omega < \Omega_e$, откуда следует условие $k \uparrow v$. Это подтверждается данными эксперимента: при инъекции электронных импульсов вверх ($\theta_0 < \pi/2$) волны распространяются преимущественно вниз, поэтому стимулированное высыпание и эффекты волна — частицы не наблюдаются. При инъекции вниз ($\theta_0 > \pi/2$) волны распространяются вверх из области $\omega < \Omega_e$ в область $\omega \rightarrow \Omega_e$ (в связи с уменьшением с высотой напряженности геомагнитного поля), производя при этом нагрев электронного компонента плазмы [6]. Для излучаемого волнового сигнала с измеренными для свистового диапазона частот спектральными характеристиками (рис. 3) эта область ($\omega \rightarrow \Omega_e$) расположена на высотах $h \lesssim 2000$ км. Благодаря создаваемой анизотропии по температуре $T_e \gg T_i$ за счет нагрева электронов в области $\omega \rightarrow \Omega_e$ возникают условия для распада свистов k_0 на свисты $k = -k_0$ и звуковые колебания $k_s \approx 2k_0$ [7]. При этом свисты эффективно взаимодействуют в области $\omega \rightarrow \Omega_e$ с электронами магнитосферного кольцевого тока, обуславливая их стимулированное высыпание. Следует подчеркнуть, что эффекты сильных взаимодействий волна — частицы наблюдались в течение циклов работы электронного инжектора при инъекции серий электронных импульсов вниз в запуске 15.II 1975 г., осуществленном во время фазы

восстановления суббури, и не наблюдались при идентичной программе работы электронного инжектора в запуске 26.I 1975 г., проводившемся в спокойный период [3]. Для обоснования плазменных механизмов, предложенных выше для объяснения экспериментальных данных, в работе [4] приведены некоторые расчеты с использованием времени запаздывания всплесков электронных потоков и волнового излучения в паузах между импульсами электронного инжектора и амплитуды всплесков.

Резкий максимум спектров излучения на частоте $\omega \sim \Omega_e/2$ (рис. 3, а-в) можно объяснить при рассмотрении резонансных условий для излучения

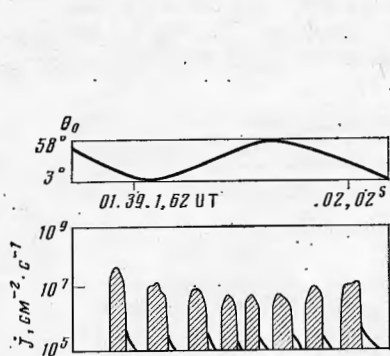


Рис. 2

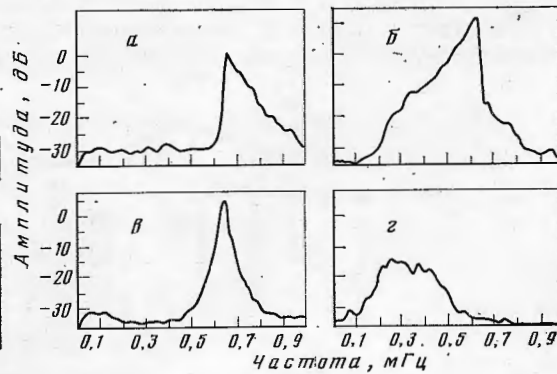


Рис. 3

Режим: 27 кэВ, $\Delta f=10$ кГц; $\tau=0,3$ мс. Значение амплитуды 0 (дБ) соответствует 1 мВ; 8-й цикл работы пушки. а - 156,071 с; 3-й импульс, $\theta=4^\circ$; б - 167,610 с, 2-й импульс, $\theta=168^\circ$; в - 162,992 с, 16-й импульс, $\theta=88^\circ$; г - 156,100 с, спектр шума в паузе

свистов: $v_{||} \sim c/N$, где $v_{||}$ - скорость излучающих электронов, N - показатель преломления для волн:

$$N^2 = 1 - \omega_{pe}^2 / [\omega(\omega - \Omega_e \cos \alpha)] \sim \omega_{pe}^2 / [\omega(\Omega_e \cos \alpha - \omega)],$$

$\alpha = \angle(\mathbf{k}, \mathbf{B})$, ω_{pe} - плазменная частота в околоракетной области плазменно-пучкового разряда [8] и/или в нейтрализующем заряд ракеты электронном потоке или в невозмущенной ионосфере (поскольку расстояние ракеты - носовой конус составляло несколько километров, возможно любое из этих предположений). Из условия $v_{||} \sim c/N$ получим:

$$\omega_{1,2} \approx \Omega_e \cos \alpha / 2 [1 \pm (1 - 4\omega_{pe}^2 v_{||}^2 / \Omega_e^2 c^2 \cos^2 \alpha)^{1/2}].$$

При $v_{||} \sim c\Omega_e/2\omega_{pe}$ корни уравнения совпадают $\omega_1 \sim \omega_2 \sim \Omega_e \cos \alpha/2$, при этом резонанс на частоте $\omega = \Omega_e/2$ может иметь место одновременно для черенковского $\omega = kv$ ($\mathbf{k} \uparrow \uparrow \mathbf{v}$) и циклотронного $\omega - \Omega_e = kv$ ($\mathbf{k} \uparrow \downarrow \mathbf{v}$) механизмов [9]. При инжекции импульсов вверх эффекты волна - частицы не обнаружены; квазиэлектростатические волны с поляризацией $\mathbf{E}_1 \uparrow \uparrow \mathbf{v}$ ($\omega = kv$) для $\omega < \Omega_e$ затухают быстрее, чем электромагнитные правополяризованные волны (свисты) ($\mathbf{E}_1 \perp \mathbf{B}$), где \mathbf{B} - напряженность геомагнитного поля, \mathbf{E}_1 - электрический вектор волны. Носовой конус находился в течение эксперимента выше ракеты. Для циклотронного механизма $\omega - \Omega_e = kv$ волны могли регистрироваться на носовом конусе и при инжекции вверх (рис. 3, а), так как расстояние между ракетой и носовым конусом инжектированные электроны проходили за время $\sim 10^{-4} \div 10^{-5}$ с. Возможное время задержки $\sim 10^{-5} \div 10^{-4}$ с появления волнового сигнала на носовом конусе относительно начала инжекции электронного импульса находится за пределами временного разрешения аппаратуры.

Поскольку носовой конус находился в электронном потоке, нейтрализующем заряд ракеты и натекающем на околоракетную область сверху, или вблизи такого потока, то размытие спектра излучаемых волн в область

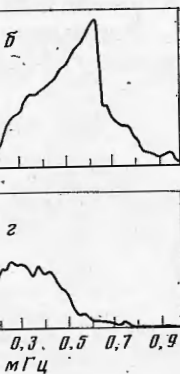
частот
(рис. 3,
объясни
вая нац
на около
ракеты
пульсом
электрон
как $k \uparrow \uparrow$
«размыт

Грубые с
вует энер
В [10]
биений в
черенков
смаатрива
цы нельз
Для о
зах между
рассеяния
ки появил
области,
ласть мож
 $\omega \rightarrow \Omega_e$, $h \approx$
кремент р
 $\div 10^2$ с⁻¹
мало для
турбулент
быть обна
го для об
волн. Одн
тичным (р
CGSE [4]
то не иск
рядка ниж
экспериме
гидродинам

$\sim \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{E_1^2}{B^2} \right)$
 $\sim 5 \cdot 10^{-5}$ В
волнового
рактерные
мов всплес
механизму
колебания
распростра
Результ
время импу

В работ
 $\omega - \Omega_e = kv$)
пазона част

программе рав-
 шемся в спо-
 измов, предло-
 , в работе [4]
 запаздывания
 паузах между
 .
 2 (рис. 3, а-е)
 для излучения



3) соответствует
 167,610 с, 2-й им-
 гр шума в паузе
 в, N — показа-

части плазмен-
 кеты электро-
 состояние раке-
 жно любое из

$\Omega_e \cos \alpha/2$, при
 временно для
 $\uparrow \downarrow v$ механиз-
 гастицы не об-
 $E_1 \uparrow \downarrow v$ ($\omega = kv$)
 яризованные
 ого поля, E_1 —
 ение экспери-
 в волны могли
 х (рис. 3, а),
 ектированные
 емя задержки
 е относительно
 ределами вре-

ке, нейтралли-
 лась сверху,
 волн в область

частот $\omega > \Omega_e/2$, $\omega < \Omega_e/2$ (рис. 3, а, б) для $\theta_0 < \pi/2$ (рис. 3, а), $\theta_0 > \pi/2$ (рис. 3, б) относительно спектра для $\theta_0 \sim \pi/2$ ($\omega \sim \Omega_e/2$) можно попытаться объяснить размытием спектра по частоте за счет доплер-эффекта, учитывая направление инъекции, направление скорости v_1 натекающего сверху на околоракетную область электронного потока, относительное положение ракеты и носового конуса, — при рассеянии излучаемых электронным импульсом волн ($\omega - \Omega_e = kv$) в нейтрализующем заряд ракеты направленном электронном потоке. Действительно: $\omega' = \omega + kv_1 > 0$ для $\theta_0 < \pi/2$, $kv_1 > 0$, так как $k \uparrow \downarrow v_1$; и $\omega' = \omega + kv_1 < 0$ для $\theta_0 > \pi/2$, $kv_1 < 0$, так как $k \uparrow \downarrow v_1$; с учетом «размытия» спектра по частоте $|\omega - \omega'|$ можно оценить v_1 :

$$v_1 \sim |\omega' - \omega|/k \sim |\omega' - \omega|c / [\Omega_e \cos \alpha - \omega]^{1/2} / \omega_{pe}$$

Грубые оценки показывают, что v_1 составляет $\sim 10^9$ см·с⁻¹, что соответствует энергии электронов $\epsilon \sim$ несколько сотен эВ.

В [10] рассмотрен другой механизм излучения волн для $\omega < \Omega_e$ (за счет биений высокочастотных электростатических колебаний, излучаемых при черенковском $\omega = kv$ и циклотронном резонансе $\omega - \Omega_e = kv$). Многие из рассматриваемых в настоящей работе характеристик эффектов волна — частицы нельзя объяснить в рамках механизма [10].

Для объяснения появления всплесков волнового сигнала $\omega < \Omega_e$ в паузах между импульсами были рассмотрены механизмы параметрического рассеяния волн для заданного частотного диапазона. По временам задержки появления всплесков волнового сигнала можно оценить расстояние до области, в которой происходило обратное рассеяние свистов [4]. Эта область может быть связана [4] с нагревом электронного компонента при $\omega \rightarrow \Omega_e$, $h \lesssim 2000$ км, и увеличением неустойчивости плазмы ($T_e \gg T_i$). Инкремент распадной неустойчивости ($k \approx -k_0$, $k_s \sim 2k_0$) составляет $\gamma \sim 10^4 \div 10^2$ с⁻¹ [4], $\gamma > \nu_{ei}$ для $h \gtrsim 500$ км; время $\tau \sim 1/\gamma$ из оценок достаточно мало для того, чтобы процессы распада (с возбуждением ионно-звуковой турбулентности на высотах $h < 2000$ км) в паузах между импульсами могли быть обнаружены, поэтому этот механизм был принят в качестве основного для объяснения наблюдавшегося явления параметрического рассеяния волн. Однако поскольку спектры излучаемых волн близки к монохроматичным (рис. 3, а-е) и для амплитуды волн $B_1 \sim ck E_1/\omega$ ($B_1 \sim 8,5 \cdot 10^{-7}$ ед. CGSE [4]), возможно, выполняется условие $B_1/B > \omega_{pi} \beta_{Ti}/\omega$, где $\beta_{Ti} = v_{Ti}/c$, то не исключена возможность раскачки турбулентности на частотах порядка нижней гибридной [11] (килогерцовый диапазон частот для условий эксперимента «Аракс»). Из оценок инкремент такого процесса [11] для гидродинамической стадии индуцированного рассеяния составляет $\gamma_N \sim$

$$\sim \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{E_1^2}{B^2} \omega_{pi}^2 \omega \right)^{1/2} \lesssim 10 \text{ с}^{-1} \text{ (для } n \approx 10^4 \text{ см}^{-3}, B \sim 0,48 \text{ Гс, } \omega \sim 4 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}, E_1 \sim$$

$\sim 5 \cdot 10^{-5} \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$) и $\gamma_N < \Delta\omega$, $k_z v_{Ti}$, где $\Delta\omega$ — ширина спектра первичного волнового пакета, поэтому инкремент должен быть ниже [11]. Однако характерные времена задержки в эффектах волна — частицы для максимумов всплесков потоков электронов и волн в паузах лучше соответствуют механизму [7] параметрического распада свистов на свисты и звуковые колебания [4] в области нагрева электронного компонента плазмы при распространении свистов по геомагнитной трубке.

Результаты анализа данных по потокам электронов, измеренным во время импульсов инжектора, приведены в [12].

1. Заключение

В работе рассмотрены основные механизмы излучения (циклотронный, $\omega - \Omega_e = kv$) и параметрического рассеяния ($k = -k_0$, $k_s \sim 2k_0$) волн для диапазона частот $\omega < \Omega_e$, позволяющие объяснить данные волновых измерений

и измерений потоков энергичных электронов во втором запуске ракеты с электронным инжектором на борту в эксперименте «Аракс».

Авторы признательны А. А. Галееву и Р. З. Сагдееву за полезное обсуждение результатов работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Cambou F., Dokukine V. S., Lavergnat J. et al.* General description of the Araks experiments.— *Ann. de Geophys.*, 1980, t. 36, № 3, p. 271.
2. *Золотарев И. Д., Брюханов Ю. А.* Автоматические анализаторы спектра рециркуляционного типа. М.: Энергия, 1973.
3. *Gringauz K. I., Izhovkina N. I., Pulinets S. A. et al.* Strong wave-particle effects during downward energetic electron injections into the ionosphere.— *Ann. de Geophys.*, 1980, t. 36, № 3, p. 371.
4. *Грингауз К. И., Жулин И. А., Ижовкина Н. И. и др.* Наблюдение стимулированного высыпания магнитосферных электронов, вызванного искусственной инъекцией электронных импульсов в ионосферу.— *Космич. исслед.*, 1981, т. 19, № 1, с. 146.
5. *Gringauz K. I., Shutte N. M., Izhovkina N. I., Pulinets S. A.* On the stimulated precipitation of electrons and the mechanism of wave generation in the whistler range in the «Araks» experiment. Active experiments in Space; Symposium at Alpbach 24–28 May 1983 (ESA SP-195, July 1983), p. 137.
6. *Иванов А. А.* Физика сильно неравновесной плазмы. М.: Атомиздат, 1977. 320 с.
7. *Галеев А. А., Сагдеев Р. З.* Нелинейная теория плазмы.— *Вопросы теории плазмы*, 1973, т. 3, с. 7.
8. *Галеев А. А., Мишин Е. В., Сагдеев Р. З. и др.* Разряд в околоракетной области при инъекции электронных пучков в ионосферу.— *Докл. АН СССР*, 1976, т. 231, № 1, с. 71.
9. *Kimura I.* On observations and theories of the VLF-emissions.— *Planet. Space Sci.*, 1967, v. 15, № 9, p. 1427.
10. *Lavergnat J., Le Queau D., Pellat R., Roux A.* Nonlinear mechanism for the production of the low frequency electrostatic waves.— *Ann. de Geophys.*, 1980, t. 36, № 3, p. 439.
11. *Trakhtengerts V. Yu.* Nonlinear hydromagnetic VLF-wave scattering in the Earth's magnetosphere.— *Planet. Space Sci.*, 1973, v. 21, № 2, p. 359.
12. *Грингауз К. И., Ижовкина Н. И., Смирнова Л. П., Шютте Н. М.* Сравнение расчетных и измеренных величин электронных потоков для широкоугольного детектора в эксперименте «Аракс».— *Космич. исслед.*, 1982, т. 20, № 6, с. 942.

Поступила в редакцию
7.II.1984