

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

КОСМИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ

Том XIX

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

1

МОСКВА · 1981

*Грингауз Е. И., Жулин И. А., Ижевкина Н. И.,
Пулинец С. А., Смирнова Л. П., Шютте Н. М.*

**НАБЛЮДЕНИЕ СТИМУЛИРОВАННОГО ВЫСЫПАНИЯ МАГНИТОСФЕРНЫХ
ЭЛЕКТРОНОВ, ВЫЗВАННОГО ИСКУССТВЕННОЙ ИНЖЕКЦИЕЙ
ЭЛЕКТРОННЫХ ИМПУЛЬСОВ В ИОНОСФЕРУ**

Во время второго запуска ракеты «Эридан» с электронным инжектором на борту в контролируемом эксперименте «Аракс» [1] широкоугольными детекторами электронов, направленными вверх и установленными на борту ракеты, были зарегистрированы интенсивные всплески потоков энергичных электронов ($j \sim 10^8 \div 10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ — амплитуда всплесков) в паузах между импульсами. Детектор представлял собой интегральную электронную ловушку с каскадом из двух микроканальных пластин (МКП) в качестве чувствительного элемента. Для защиты МКП от возможного воздействия прямого и рассеянного излучения Солнца входные отверстия микроканалов покрывались алюминиевой пленкой, прозрачной для электронов с энергией $> 5 \text{ кэВ}$. Угловая диаграмма прибора составляла $\pm 45^\circ$, чувствительность $\sim 10^5$ электрон- $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Подробное описание приведено в [2].

Указанные потоки не могли быть связаны с рассеянием инжектированных электронных пучков в атмосфере [3]. В работе [4] было показано, что причиной появления всплесков электронных потоков в паузах могло быть стимулированное высыпание магнитосферных электронов, и проведено сопоставление данных широкоугольного детектора с результатами наблюдений волнового излучения в диапазоне свистовых мод, $\omega < \Omega_e$, $f < 1,3 \text{ МГц}$ (Ω_e — локальная gyroчастота для точки инжекции импульса). Измерения волнового излучения проводились с помощью широкополосного приемника, установленного на отделяемом от ракеты носовом конусе [4, 5] (измерение электрической компоненты волн в полосе частот $0,1 \div 5 \text{ МГц}$ при чувствительности на входе приемника 10^{-5} В ; сигнал для свистовых мод был выделен с помощью фильтра с полосой пропускания $\Delta f = 300 \text{ кГц}$, настроенного на частоту максимума излучения для диапазона $f < 1,3 \text{ МГц}$). В результате сопоставления результатов измерений потоков электронов с энергиями $E > 8 \text{ кэВ}$ и волнового излучения $\omega < \Omega_e$ было получено:

1) в паузах, следовавших за импульсами электронного инжектора ($E_0 = 27 \text{ кэВ}$, $I_0 = 0,5 \text{ А}$), направленных в нижнюю полусферу относительно плоскости, перпендикулярной силовым линиям геомагнитного поля, наблюдались всплески электронных потоков из верхней полусферы и волнового излучения. При инжекции импульсов ($E_0 = 27 \text{ кэВ}$, $I_0 = 0,5 \text{ А}$) в верхнюю полусферу всплески электронных потоков ($j > 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, $E > 8 \text{ кэВ}$) в паузах не наблюдались;

2) при изменении режима инжекции ($E_0=15$ кэВ, $I_0=0,5$ А) всплески электронных потоков и волнового излучения для диапазона свистовых мод в паузах не были обнаружены;

3) во время длительных пауз между электронными импульсами всплески потоков электронов и волнового излучения не наблюдались;

4) для запуска, осуществленного в спокойный период (26.I 1975 г., $K_p \sim 1$), всплески электронных потоков и излучения в паузах также не были обнаружены;

5) величина всплесков электронных потоков в паузах и амплитуда электрической компоненты для волнового излучения в это же время обнаруживают зависимость от начальных питч-углов электронов для предшествующих электронных

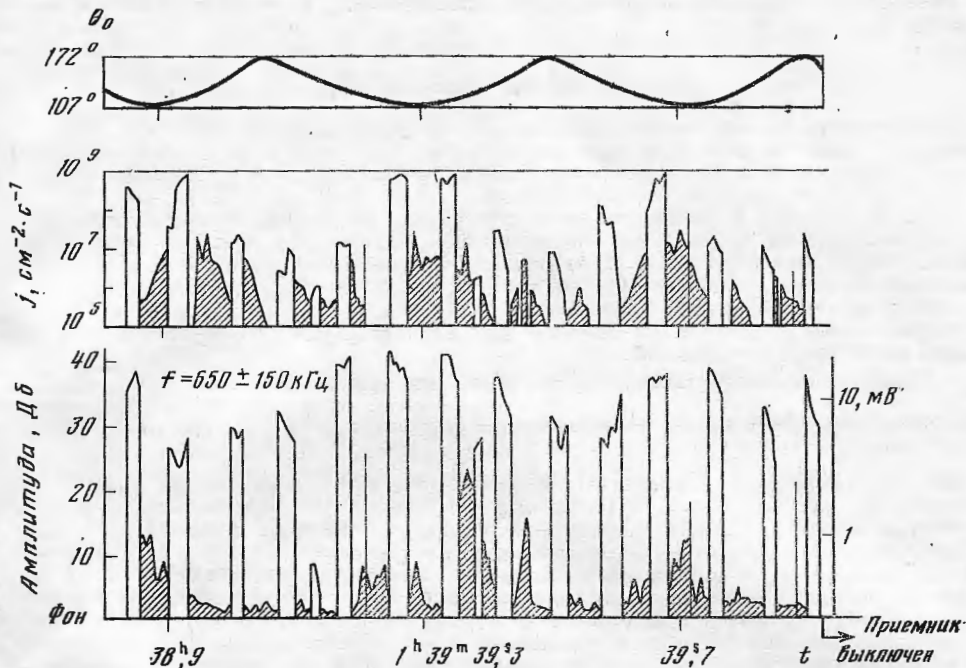


Рис. 1

импульсов (период модуляции электронных потоков в паузах равен периоду изменения начальных питч-углов инжектированных электронов); для волнового излучения, измеренного во время импульсов и в паузах, кроме этой модуляции, наблюдается дополнительная модуляция, связанная с вращением вокруг оси и прецессией носового конуса, на котором был установлен приемник.

На рис. 1 приведены данные сопоставления измерений потоков электронов и волнового излучения для одной из серий электронных импульсов. В верхней части рисунка приведено изменение начальных питч-углов θ_0 инжектированных электронов для этой серии. В средней части рисунка представлены результаты измерений потоков электронов, в нижней части — данные по волновому излучению для диапазона свистовых мод; зачерненные части рисунка соответствуют сигналам, измеренным во время работы электронного инжектора (включая кратковременные незапрограммированные периоды работы инжектора типа пробоя). Электронные потоки, измеренные во время импульсов инжектора, рассматриваются в [3]. Они связаны в основном с рассеянием инжектированных электронов в атмосфере. Затрихованные части рисунка соответствуют сигналам, измеренным в паузах между импульсами электронного инжектора. Из данных, представленных на этом рисунке, видна периодичность изменения амплитуды волнового излучения (в паузах и во время работы инжектора) и электронных потоков в зависимости от начального питч-угла инжектированных электронов.

Анализ экспериментальных данных. Рост амплитуды волнового излучения для свистовых мод с увеличением энергии инжектированного электронного импульса для направления, перпендикулярного геомагнитному полю, представляется закономерным [6] (см. рис. 1, для $\theta_0 \sim 107^\circ$ амплитуда волнового сигнала выше, чем для $\theta_0 \sim 172^\circ$ примерно в два раза). Поскольку амплитуда излучаемых волновых пакетов модулирована в зависимости от начального питч-угла инжектируемых электронов, то, по-видимому, с этим следует связывать модуляцию высыпающихся электронных потоков по величине в зависимости от начального питч-угла инжектированных электронов для предшествующих электронных импульсов.

Появление всплесков волнового излучения в паузах позволяет предположить, что излучаемые при инжекции волны при своем распространении вверх вдоль геомагнитной силовой трубки рассеивались и /или отражались назад на некотором расстоянии от точки инжекции электронного импульса. Расстояние до «области отражения» волнового пакета оценивалось по формуле $l \sim v_g \tau / 2$, где v_g — групповая скорость свистов, $v_g \approx [B / (4\pi n m)]^{1/2} 2[(\omega / \Omega_e)(1 - \omega / \Omega_e)]^{1/2}$, B — напряженность геомагнитного поля, n — плотность плазмы, τ — время запаздывания всплесков волнового излучения (τ оценивалось по времени запаздывания для волнового сигнала максимальной амплитуды в паузе относительно предшествующего электронного импульса; временем задержки для излучения свистовых мод относительно начала инжекции электронного импульса можно пренебречь). Для оценок групповой скорости полагалось:

$$n = 10^4 \div 10^5 \text{ см}^{-3} \quad (200 < h < 500 \text{ км}) \text{ и}$$

$$n = 10^3 \div 10^2 \text{ см}^{-3} \quad (h > 500 \text{ км}),$$

напряженность геомагнитного поля и Ω_e оценивались вдоль геомагнитной силовой линии с помощью модели внутреннего геомагнитного поля POGO (8/71) [7]. При этом оказалось, что для волнового пакета $f = 650 \pm 150$ кГц $v_g \approx 10^{10}$ см·с⁻¹ ($v_g \sim 5 \cdot 10^9$ см·с⁻¹) и для $\tau \approx 20 \div 80$ мс, $l \approx 2000$ км.

Из наблюдений известно, что конус потерь для электронов, захваченных магнитосферной силовой трубкой, для высот $h < 2000$ км, близок к $\pi/2$. При распространении волнового пакета вверх вдоль геомагнитной силовой трубки пакет из области, где выполняется условие $\omega < \Omega_e$, попадает в область $\omega \sim \Omega_e$, при этом происходит увеличение коэффициента преломления для волн [8] и улучшение условий для резонанса волна — частица ($\omega - \Omega_e = kv_{\parallel}$) для магнитосферных электронов в области зеркальных точек ($h < 2000$ км).

Коэффициент питч-угловой диффузии для электронов составляет $D_{\theta} = (\overline{\Delta\theta})^2 / 2\tau_1$, $D_{\theta} \sim \frac{1}{2} \Omega_e^2 (B_k' / B)^2$, где B_k' — спектральная амплитуда волн для диапазона свистовых мод (магнитная компонента), $B_k' = B_1 / (\Delta f)^{1/2}$, B_1 — амплитуда излучения для волнового пакета, $B_1 \sim \omega_{Le} E_1 / [\omega (\Omega_e \cos \varphi - \omega)]^{1/2}$, где ω_{Le} — плазменная частота, φ — угол между волновым вектором k и силовой линией геомагнитного поля ($\cos \varphi$ полагался равным 1), E_1 — амплитуда электрического поля для волнового пакета (измеренные в эксперименте значения амплитуды составили $E_1 \sim 1$ мВ/м), τ_1 — длительность излучения волнового пакета ($\tau_1 \approx 2 \cdot 10^{-2}$ с — время излучения волнового пакета в эксперименте было порядка времени длительности электронного импульса).

Для области вблизи зеркальных точек, где продольная скорость магнитосферных электронов существенно меньше поперечной (по отношению к магнитному полю), характерное время изменения питч-угла при взаимодействии волна — частица для резонансных электронов можно, по-видимому, положить порядка временной длительности излучения волн τ_1 . Оценки показали, что в среднем изменение питч-угла ($\overline{\Delta\theta}$) для резонансных электронов при их взаимодействии с излучаемыми при инжекции электронного импульса свистовыми модами составляет $\Delta\theta \sim (D_{\theta} \tau_1)^{1/2} \sim 10^{-1} \div 10^{-2}$ рад. Такое изменение питч-угла электронов вблизи зеркальных точек представляется достаточным для того, чтобы высыпание магнитосферных электронов в конус потерь могло быть обнаружено. Плотность резонансных электронов вблизи зеркальных точек из оценок составляет $n_R \sim j / v \sim 10^{-3} \div 10^{-1}$ см⁻³ ($v \approx 5 \cdot 10^9$ см·с⁻¹ для $E > 8$ кэВ).

При распространении волнового пакета вверх вдоль геомагнитной силовой трубки в области $\omega \approx \Omega_e$ (для волнового пакета $f = 650$ кГц, $\Delta f = 300$ кГц эта область расположена на высоте $h < 2000$ км и имеет протяженность порядка нескольких сотен километров вдоль геомагнитных силовых линий) при приближении волн к точке циклотронного резонанса $\omega \sim \Omega_e$, по-видимому, могло иметь место сильное затухание волн и нагрев электронной компоненты плазмы [9]. Для волнового пакета для оценок нагрева электронной компоненты можно использовать приближение квазилинейной теории [9]: $(\Delta v_{\perp})^2 \sim \Omega_e^3 (B_1 / B)^2 c^2 \tau_1 / \omega_{Le}^2$, где Δv_{\perp} — увеличение скорости электронов в направлении, перпендикулярном геомагнитному полю. Для условий эксперимента «Аракс» изменение поперечной скорости Δv_{\perp} может составлять $10^8 < \Delta v_{\perp} < 10^9$ см·с⁻¹, т.е. увеличение энергии электронов на несколько электронвольт представляется возможным (за счет диффузии в пространстве скоростей происходит одновременно нагрев по продольной компоненте скорости электронов). Нагрев электронов в области циклотронного резонанса может привести к высыпанию частиц в конус потерь и к увеличению неизотермичности магнитосферной плазмы ($T_e \gg T_i$). При выполнении условия $T_e \gg T_i$ можно предположить, что наблюдавшееся в эксперименте отражение волн в противоположном направлении на высотах $h < 2000$ км могло быть вызвано распадом свистов k_0 (k_0 — волновой вектор) на свисты $k_1 = -k_0$ и звуковые колебания $k_s = 2k_0$ [10] с инкрементом распадной неустойчивости $\gamma = [(k_s^2 k_0 v_g / 8 \omega_s) (B_1^2 / 2\pi n M)]^{1/2}$, где $\omega_s \approx 2k_0 c_s$, $c_s \sim (T_e / M)^{1/2}$ — частота и скорость звуковых колебаний; k_0 определялось из дисперсионного уравнения для свистов $k_0 \approx$

$\approx [\omega_{L_e}^2 \omega / c^2 (\Omega_e \cos \varphi - \omega)]^{1/2}$. Для оценок инкремента распадной неустойчивости задавались следующие параметры плазмы: $T_e \sim 5$ эВ, $M \sim 1,6 \cdot 10^{-24}$ г (водородная плазма), $n \leq 10^4$ см $^{-3}$ ($h < 2000$ км), $c_e \sim 10^8$ см·с $^{-1}$. Из оценок было получено $\gamma \sim 10^{1-2} \div 10^2$ с $^{-1}$, что превышает частоту столкновений электронов и ионов с нейтралами для высот $h > 500$ км.

Пока не очень понятен факт исчезновения интенсивных всплесков электронных потоков в паузах при инжекции электронных импульсов в режиме $E_0 = 15$ кэВ. Можно предположить, что при переходе к режиму $E_0 = 15$ кэВ, $I_0 = 0,5$ А от режима $E_0 = 27$ кэВ, $I_0 = 0,5$ А (диапазон изменения начальных питч-углов инжектируемых электронов оставался прежним) исчезновение рассматриваемых эффектов могло быть вызвано уменьшением амплитуды излучаемого волнового пакета в связи с уменьшением энергии инжектируемых электронов (и мощности импульсов). Важным фактором для рассматриваемого в этой работе явления может быть и то, что для режима $E_0 = 27$ кэВ, $I_0 = 0,5$ А плазмогенератор, использованный в эксперименте в качестве дополнительного источника нейтрализации ракеты, был выключен, а для инжекции импульсов в режиме $E_0 = 15$ кэВ, $I_0 = 0,5$ — включен. При включенном плазмогенераторе на телеметрической записи для электронного детектора появились систематические помехи (в том числе и в паузах между сериями импульсов пушки), поэтому для режима $E_0 = 15$ кэВ можно лишь констатировать, что всплески электронных потоков в паузах между импульсами интенсивностью $j > 10^7$ см $^{-2}$ ·с $^{-1}$ не наблюдались.

Для запуска 26.I 1975 г. (спокойный период) спектр излучаемых во время инжекции электронных импульсов волн ($\omega < \Omega_e$) сильно отличался от спектра для 15.II 1975 г. (фаза восстановления суббури). На рис. 2, а представлен спектр для 26.I 1975 г., на рис. 2, б, в — спектр для 15.II 1975 г. В связи с различием спектров можно предположить, что область циклотронного резонанса для волнового пакета $f \sim 150$ кГц, $\Delta f \sim 300$ кГц (26.I, рис. 2, а) при распространении пакета вверх вдоль геомагнитной силовой трубки была расположена существенно дальше от ракеты, чем для пакета $f \sim 650$ кГц, $\Delta f \sim 300$ кГц (15.II). Кроме того, из наблюдавшегося различия спектров волн в эксперименте можно сделать заключение о том, что поскольку параметры электронных импульсов (начальная энергия, сила тока и питч-угол) были одинаковы для обоих запусков, а спектры излучаемых во время инжекции волн отличались, то, по-видимому, параметры ионосферной плазмы (и, вероятно, магнитосферной) были различны. Возможно, что это и было основной причиной появления рассматриваемых в данной работе эффектов только для запуска, осуществленного в возмущенный период.

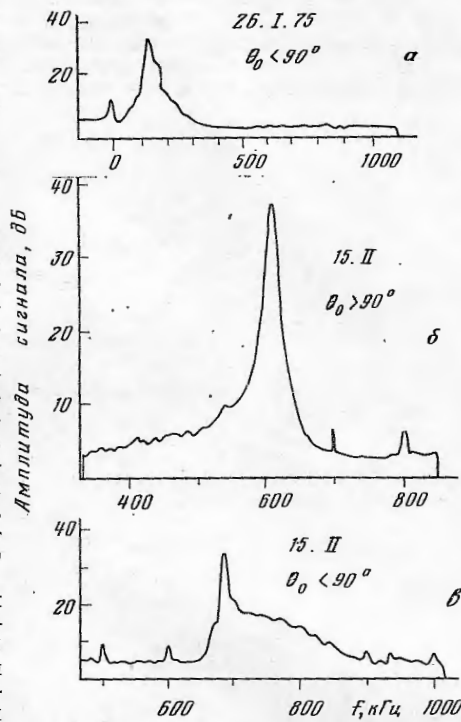


Рис. 2

ЛИТЕРАТУРА

1. F. Cambou et al. Nature, 274, 723, 1978.
2. G. I. Volkov et al. Space Sci. Instrum., 4, 189, 1978.
3. Н. И. Ижовкина. Геомагнетизм и аэрономия, 20, № 4, 621, 1980.
4. K. I. Gringauz et al. Ann. Geophys., 36, 371, 1980.
5. G. A. Gusev et al. Space Sci. Instrument., 4, 171, 1978.
6. Р. З. Сагдеев, В. Д. Шафранов. ЖЭТФ, 39, 181, 1960.
7. R. A. Langel. Near Earth magnetic disturbances in total field at high latitudes. Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, X-645-73-225, 1973.
8. C. F. Kennel, H. F. Petschek. J. Geophys. Res., 75, 6153, 1970.
9. А. А. Иванов. Физика сильнонеравновесной плазмы. М., Атомиздат, 1977.
10. А. А. Галеев, Р. З. Сагдеев. Вопросы теории плазмы, 7, 3, 1973.

Поступила в редакцию
21.IV.1979