

УДК 533.951

ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКОВ В ОКОЛОРАКЕТНОЙ ОБЛАСТИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ “АРАКС”

© 2012 г. Н. И. Ижовкина

ФГБУ науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения
радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН, г. Троицк (Московская обл.)

e-mail: izhovn@izmiran.ru

Поступила в редакцию 22.06.2010 г.

После доработки 25.09.2010 г.

В эксперименте “АРАКС” производилась инжекция электронных импульсов с борта ракеты в ионосферу. Для разных серий импульсов начальная энергия электронов составляла 27 и 15 кэВ при силе тока ~ 0.5 А. На борту ракеты методом запаздывающего потенциала проводились измерения распределения электронных потоков, направленных к ракете, по энергии электронов до 3000 эВ. В работе показано, что появление экстремумов интенсивности электронных потоков на хвосте распределения электронов по энергии выше ~ 200 эВ можно объяснить немонотонным ускорением электронов в полях электростатической турбулентности. Возможно влияние поляризационного дрейфа на динамику потоков электронов и ионов. Следует отметить, что на высотах ниже 130 км экстремумы интенсивности потоков не наблюдались. Это может быть связано с подавлением электростатических колебаний столкновениями электронов с компонентами ионосферы.

1. ВВЕДЕНИЕ

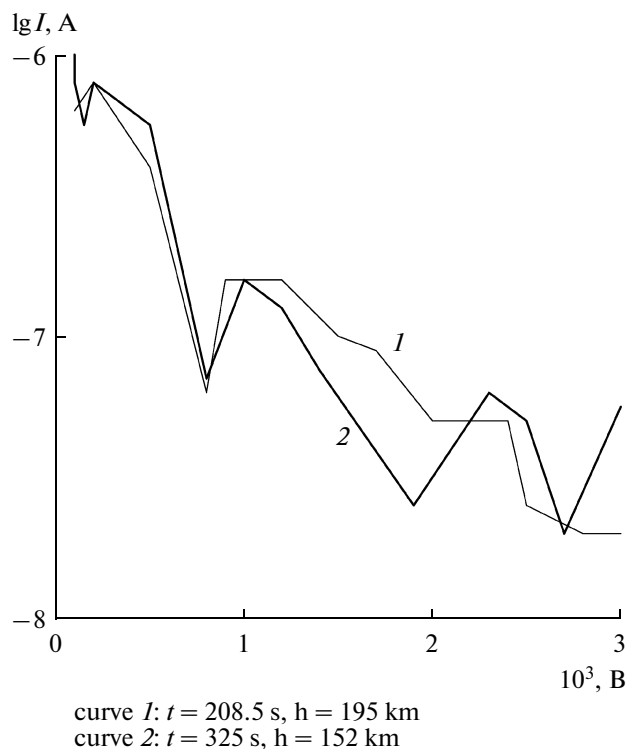
Исследования неустойчивостей низкотемпературной плазмы в околоземном космическом пространстве представляют интерес для физики горячей замагниченной плазмы. В активных экспериментах такие исследования проводятся при заданных начальных условиях. В проекте “АРАКС” в 1975 г. с о-ва Кергелен в Индийском океане ($L \sim 4$, L – параметр Мак-Илвэйна) в ионосферу были запущены две ракеты с электронным инжектором на борту [Cambou et al., 1980] с целью генерации искусственного полярного сияния в магнитосопряженной области ионосферы и исследования плазменных процессов. В комплексе бортовой аппаратуры на борту ракеты были установлены анализаторы потоков электронов RPA с запаздывающим потенциалом [Gringauz et al., 1978]. Приборы RPA в эксперименте были использованы для определения электрического потенциала ракеты во время инжекции электронных импульсов. Приборы RPA использовались и в других активных экспериментах с электронными импульсами в околоземной космической плазме [Hess et al., 1971; Winckler, 1974]. В эксперименте “АРАКС” с помощью RPA можно получить несколько кривых зависимости от запаздывающего потенциала для интенсивности потоков электронов на ракету в течение одного длинного импульса электронного инжектора.

В этой работе показано, что потоки электронов, наблюдавшиеся на хвосте функции распределения электронов по энергии, могли быть связаны с на-

гревом электронов в полях электростатической турбулентности в горячей замагниченной неустойчивой плазме при инжекции электронных импульсов в ионосферу.

2. ДАННЫЕ ИЗМЕРЕНИЙ

В эксперименте “АРАКС” были использованы два одинаковых прибора RPA, направленные под углом $\sim \pi/2$ один относительно другого, к оси ракеты и направлению инжекции электронных импульсов. В конструкции прибора был использован коллектор и система параллельно установленных сеток [Gringauz et al., 1978]. Период изменения потенциала в приборе RPA составлял 0.64 с и был синхронизован с работой электронного инжектора. При пилообразном изменении потенциала во времени время нарастания потенциала составляло 0.56 с и убывания – 0.12 с. Запись величины тока на коллектор и запаздывающего потенциала производилась каждые 30 мс. Запаздывающий потенциал изменялся пилообразно во времени для одного анализатора от 9 до 300 В, для другого – от 90 до 3000 В. Это исключало регистрацию низкоэнергичных электронов. Диапазон изменения потенциала был поделен на 18 интервалов таким образом, что ступенька изменения потенциала для прибора, работавшего в диапазоне 9–300 В, изменялась от 3 до 20 В, а для прибора с диапазоном 90–3000 В, соответственно, от 30 до 200 В. Динамический диапазон измеряемого тока на коллектор прибора составлял 10^{-10} – 10^{-6} А, максимум плотности тока не



Данные измерений тока на коллектор $\lg I$, А, в зависимости от величины запаздывающего потенциала V_R , В. Кривая 1 построена для $h = 195$ км, $t = 208.5$ с, кривая 2 — для $h = 152$ км, $t = 325$ с, где t — время с момента старта ракеты, h — высота.

превышал 2×10^{-7} А/см². Если предположить, что электрический заряд ракеты полностью нейтрализовался электронными потоками из окружающей ракету плазмы, нейтрализующий электронный поток составляет по плотности 2.5×10^{-5} А/см² при полной площади поверхности ракеты $\sim 2 \times 10^4$ см². Это означает, что максимальная плотность тока, измеряемого прибором [Gringauz and Shutte, 1980], на два порядка ниже ожидаемого нейтрализующего тока. При этом в простой модели нейтрализации ракеты электронным потоком из окружающей ракету плазмы предполагалось, что потенциал ракеты можно оценить по скачку электронного потока на коллектор прибора. Для коротких инжектируемых электронных импульсов длительностью $\tau = 0.02$ с такая модель оценки потенциала не годится. Достаточно сложно оценить потенциал и для длинных импульсов в случае плавного изменения тока на коллектор при изменении запаздывающего потенциала. В этой работе рассмотрены измерения для наиболее длинных импульсов, инжектированных в эксперименте с питч — углом относительно геомагнитного поля $\sim 6^\circ$. Генератор запаздывающего потенциала был синхронизован с работой электронного инжектора таким обра-

зом, что в течение каждого длинного импульса с помощью анализатора RPA измерялись четыре кривых зависимости тока на коллектор от запаздывающего потенциала. Для усиления нейтрализующего ракету тока в эксперименте был использован цезиевый плазмогенератор с эффективным током электронов порядка 10 А [Morozov et al., 1978].

При анализе данных измерений было обнаружено, что характеристики кривых тока на коллектор прибора существенно не изменялись при инжекции серий электронных импульсов с начальной энергией электронов 27 и 15 кэВ. Включение и выключение плазмогенератора также слабо влияли на общий вид кривых токов на коллектор. Резкое падение тока на коллектор наблюдалось во всех случаях измерений при величине запаздывающего потенциала $V_R > 200$ В [Gringauz and Shutte, 1980]. При этом для $V_R < 200$ В во всех случаях измерений наблюдались токи насыщения — прибор «зашкаливало». Инжекция серий электронных импульсов при начальной энергии электронов 27 и 15 кэВ при силе тока ~ 0.5 А в верхнюю и нижнюю полусферы относительно геомагнитной силовой линии производилась в диапазоне высот ~ 100 – 200 км. При этом на нисходящей части траектории ракеты включался плазмогенератор [Cambou et al., 1980]. Таким образом, параметры плазмы, в которую производилась инжекция электронных импульсов, были существенно изменчивы. Можно предположить, что потенциал ракеты во время инжекции электронных импульсов в среднем соответствовал величине ~ 200 В. Следует отметить, что на высотах более 115 км скачки тока насыщения на электронный коллектор становятся менее крутыми. Влияние вращения ракеты вокруг оси на ориентацию прибора относительно геомагнитного поля в данных по току насыщения прибора обнаружить не удалось. Время появления нейтрализующего ракету тока относительно начала инжекции электронного импульса не превышало 30 мс. На высотах более 115 км для запаздывающего потенциала $V_R > 200$ В наблюдались максимумы и минимумы тока при разных значениях V_R . Примеры таких кривых тока представлены на рисунке. При включении плазмогенератора амплитуда вариаций тока на хвосте распределения для $V_R > 200$ В уменьшалась. Интенсивность потоков электронов с энергией 1–2 кэВ уменьшалась с уменьшением высоты, и на высотах ниже 125 км эти потоки практически исчезали. На кривых тока экстремумы потоков электронов на хвосте распределения электронов по энергии в течение одного импульса электронного инжектора появлялись и исчезали.

На носовом конусе, отделенном от ракеты и двигавшемся впереди и вверх от ракеты на расстоянии несколько километров, была установле-

на аппаратура для измерения волнового излучения [Cambou et al., 1980; Lavergnat et al., 1980]. Во время инъекции электронных импульсов в ионосферу было обнаружено излучение в различных диапазонах частот от ОНЧ до ВЧ [Lavergnat et al., 1980a, b; Dechambre et al., 1980a, b, c; Le Queau et al., 1980]. Следует отметить, что непосредственно на ракетах, с борта которых производилась инъекция электронных импульсов, волновые измерения не проводились по причинам технического характера.

3. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ В ПЛАЗМЕ, ВОЗМУЩЕННОЙ ПРИ ИНЖЕКЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ ИМПУЛЬСОВ, И ПОТОКИ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

Следует предположить, что наиболее интенсивным электростатическое излучение могло быть непосредственно в области распространения потоков заряженных частиц: инжектируемых с борта ракеты электронных потоков и потоков, нейтрализующих заряд ракеты. Нагревом в полях электростатической турбулентности можно объяснить отрастание хвоста энергичных электронов в распределении электронов по энергии, измеренном приборами РРА. При этом на хвосте распределения потоков по энергии электронов наблюдались дополнительно экстремумы измеряемого тока. Параметры ионосферной слабоионизованной плазмы на высотах ~115–125 км и выше изменяются плавно. По-видимому, влиянием столкновений заряженных частиц с компонентами ионосферы на возбуждение электростатических колебаний можно объяснить динамику потоков энергичных электронов в зависимости от высоты. С ростом плотности нейтральной ионосферы при уменьшении высоты происходит срыв (подавление) электростатических колебаний при столкновениях заряженных частиц с ионосферными компонентами. Это может быть основной причиной исчезновения экстремумов потоков на хвосте распределения электронов для потенциала $V_R > 200$ В.

Расслоение области повышенной плотности плазмы вблизи ракеты, образующейся в сходящихся к ракете потоках нейтрализующих заряд ракеты электронов, может играть важную роль в механизме образования экстремумов на хвосте распределения электронов по энергии.

Зададим функцию распределения заряженных частиц фоновой плазмы, например, электронов, в достаточно общем виде

$$f(\mathbf{v}, \mathbf{r}) = f(\mathbf{v})N(\mathbf{r}), \quad (1)$$

где $N(\mathbf{r})$ – пространственное распределение плотности неоднородной замагниченной плаз-

мы, $f(\mathbf{v})$ – функция распределения частиц в пространстве скоростей,

$$N(\mathbf{r}) = N_0 \exp(-r_{\perp}^2/a^2 - z^2/b^2). \quad (2)$$

Плотность плазмы задана в цилиндрической системе координат с осью z , параллельной внешнему магнитному полю \mathbf{B}_0 , N_0 – плотность в центре плазменной неоднородности, z, r_{\perp} – расстояния вдоль и поперек геомагнитного поля от центра неоднородности, a, b – размерные параметры.

Распределение частиц по скоростям представим в виде

$$f(\mathbf{v}) = (2\pi)^{-3/2} \alpha^{-1} \beta^{-2} \exp(-v_z^2/\alpha^2 - v_{\perp}^2/\beta^2), \quad (3)$$

где α, β – продольная и поперечная относительно внешнего магнитного поля тепловые скорости частиц для фоновой плазмы.

Для цилиндрически симметричной неоднородности (1, 2) и цилиндрически симметричных электростатических возмущений диэлектрическая проницаемость ϵ_l имеет вид (для расчетов использован метод [Ижовкина и др., 2001])

$$\begin{aligned} \epsilon_l = 1 + \frac{\omega_{p0}^2}{k^2 \sqrt{2}} \exp(-k_z^2 b^2 / 4) \exp(-k_{\perp}^2 a^2 / 4) J_0(k_{\perp} r_{\perp}) \times \\ \times a^2 b \pi^{3/2} \frac{1}{(2\pi)^2} \int_0^{\infty} k'_{\perp} dk'_{\perp} \int_{-\infty}^{\infty} dk'_z \exp[i(k'_z - k_z)z] \times \\ \times \exp[-(k'_z{}^2 - 2k_z k'_z) b^2 / 4] \exp(-k'_{\perp}{}^2 a^2 / 4) \times \\ \times I_0\left(\frac{k_{\perp} k'_{\perp} a^2}{2}\right) J_0(k'_{\perp} r_{\perp}) \exp(-k'_{\perp}{}^2 \beta^2 / 2\Omega^2) \times \\ \times \sum_n I_n\left(\frac{k'_{\perp}{}^2 \beta^2}{2\Omega^2}\right) \left\{ \alpha^{-1} \left[\frac{1}{\alpha} (x_n Z(x_n) + 1) \frac{k_z}{k'_z} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{n\Omega k_{\perp}}{k'_z \beta^2 k'_{\perp}} Z(x_n) \right] \right\}, \quad (4) \end{aligned}$$

где k_{\perp}, k_z – составляющие волнового вектора \mathbf{k} , параллельная и ортогональная геомагнитному полю, $\omega_{p0}^2 = 4\pi N_0 e^2 / m$; e, m – масса и заряд электрона; J, I – функции Бесселя первого рода и модифицированные функции Бесселя; $\Omega = eB_0 / mc$ – циклотронная частота; $Z(x_n)$ – плазменная дисперсионная функция; $x_n = (\omega - n\Omega) / (k'_z \alpha)$, ω – частота колебаний.

При прохождении электронного потока через центр неоднородности в диэлектрической проницаемости появится дополнительное слагаемое $\Delta\epsilon_b$, например, для модельного потока, заданного в виде

$$f_b(\mathbf{r}, \mathbf{v}) = N_b(\mathbf{r})f_b(\mathbf{v}), \quad (5)$$

$$N_b(\mathbf{r}) = N_{0b} \exp(-r_{\perp}^2/d^2), \quad (6)$$

$$f_b(\mathbf{v}) = (2\pi)^{-3/2} v_{zb}^{-1} v_{\perp b}^{-2} \delta(v_{\perp} - v_{\perp b}) \exp\left[-\left(\frac{v_z - U_b}{v_{zb}}\right)^2\right], \quad (7)$$

где N_{0b} – плотность пучка в центре неоднородности; d – характерный размер пучка поперек внешнего магнитного поля; v_{zb} – тепловая скорость для потока, направленного со скоростью U_b вдоль внешнего магнитного поля; $v_{\perp b}$ – среднестатистическая скорость для направления, ортогонального \mathbf{B}_0 ; δ – дельта-функция. Для модели (5–7) $\Delta\varepsilon_b$ имеет вид

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_b &= \frac{\omega_{p0b}^2 \sqrt{2}}{k^2} J_0(k_{\perp} r_{\perp}) \exp(-k_{\perp}^2 d^2/4) \times \\ &\times \frac{d^2}{2\pi} \int_0^{\infty} k'_{\perp} dk'_{\perp} \exp(-k'_{\perp}{}^2 d^2/4) I_0\left(\frac{k'_{\perp} k_{\perp} d^2}{2}\right) \times \\ &\times J_0(k'_{\perp} r_{\perp}) \sum_n \left\{ J_n^2\left(\frac{k'_{\perp} v_{\perp b}}{\Omega}\right) (x_b Z(x_b) + 1) \frac{1}{v_{zb}^2} + \right. \quad (8) \\ &+ \frac{n^2 \Omega k_{\perp}}{v_{\perp b}^2 k'_{\perp}} J_n^2\left(\frac{k'_{\perp} v_{\perp b}}{\Omega}\right) Z(x_b) \frac{1}{k_z v_{zb}} - \frac{nk_{\perp}}{v_{\perp b}} J_n\left(\frac{k'_{\perp} v_{\perp b}}{\Omega}\right) \times \\ &\left. \times J_{n+1}\left(\frac{k'_{\perp} v_{\perp b}}{\Omega}\right) Z(x_b) \frac{1}{k_z v_{zb}} \right\}, \end{aligned}$$

где $x_b = (\omega - n\Omega - k_z U_b)/(k_z v_{zb})$, $\omega_{p0b}^2 = 4\pi N_{0b} e^2/m$.

Поверхности собственных частот в пространстве волновых векторов рассчитываются из уравнения $\varepsilon = \varepsilon_l + \Delta\varepsilon_b = 0$. Как видно из представленных выражений, при монотонной зависимости от пространственных координат плотности плазмы и плотности электронного потока ε зависит от координат немонотонным образом. Для случая слабой неоднородности амплитуда колебаний кривой ε относительно 1 зависит от плотности плазмы, появление (или исчезновение) собственных мод колебаний определяется плазменной плотностью. Уровень электростатических возмущений (и ширина спектра собственных мод) в областях с повышенной плотностью возрастает. В областях с пониженной плотностью плазмы при переходе колебаний из режима собственных мод для плазмы в режим вынужденных возмущений происходит нагрев плазмы и вытеснение ее из этих областей за счет градиента давления. В результате наблюдается самомодуляция плотности неустойчивой неоднородной плазмы, при этом влияние на этот процесс оказывает электростатическая неустойчивость как электронных потоков, так и фоновой плазмы.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В течение длинного электронного импульса распределение электронного потока по энергии измерялось в четырех циклах работы анализатора с запаздывающим потенциалом RPA. В каждом из циклов наблюдались токи насыщения для $V_R < 200$ В на всех высотах. Потоки на хвосте энергетического распределения $V_R > 200$ В и экстремумы для этих потоков наблюдались на высотах $h > 130$ км. Поскольку параметры ионосферной плазмы изменяются с высотой без скачков и разрывов, исчезновение энергетического хвоста распределения электронов и, соответственно, экстремумов потоков на хвосте распределения можно объяснить подавлением электростатической турбулентности. На высотах $h < 115$ км электростатические колебания в ионосферной плазме могут быть подавлены столкновениями заряженных частиц с компонентами ионосферы. Плотность нейтральной атмосферы с уменьшением высоты нарастает. Ионизованный компонент ионосферы может иметь более сложное распределение по плотности в зависимости от высоты. По-видимому, основную роль в указанных выше изменениях энергетического распределения электронов в нейтрализующем заряд ракеты потоке играли столкновения заряженных частиц с нейтралами ионосферы. Появление экстремумов на хвосте распределения электронов по энергии может быть проявлением немонотонного нагрева электронного компонента плазмы в полях затухающих электростатических колебаний. Такое затухание возможно в областях пониженной плотности плазмы.

Прогрев областей пониженной плотности плазмы коротковолновыми электростатическими колебаниями электронного компонента плазмы, попадающими на уровни плотности плазмы ниже критического для свободных колебаний [Ижовкина и др., 2001], связан с появлением поляризации потоков заряженных частиц поперек силовых линий геомагнитного поля.

Скорость поляризационного дрейфа частиц в переменном электрическом поле составляет [Редерер, 1972]

$$v_d = m_{e,i} c^2 (\partial E_{\perp} / \partial t) / (q_{e,i} B^2), \quad (9)$$

где $m_{e,i}$, $q_{e,i}$ – масса и заряд электронов и ионов, E_{\perp} – компонент электрического поля, ортогональный внешнему магнитному полю, t – время. Для напряженности электрического поля колебаний $E_{\perp} \sim 10^{-5}$ ед. CGSE, затухающего за время, сопоставимое с периодом циклотронного вращения электронов, скорость поляризационного дрейфа ионов превышает тепловую при однократном прохождении ионами области затухания поля. Для электронов скорость поляризационно-

го дрейфа может превысить тепловую при многократных (порядка 10^3) столкновениях электронов с областями затухания электростатических возмущений. Электроны при своем движении в неустойчивой ионосферной плазме могут многократно сталкиваться с областями пониженной плазменной плотности, в которых затухают электростатические колебания электронного компонента плазмы при переходе из режима свободных колебаний в режим вынужденных возмущений. В связи с поляризационным дрейфом следует отметить, что не только потоки электронов, направленные к ракете, способствовали нейтрализации заряда ракеты во время инъекции электронных импульсов. Не исключено, что при сильно развитой турбулентности поляризационные ионные потоки играли существенную роль в нейтрализации заряда. Немонотонная стратификация по плотности плазмы в околоракетной области также может иметь важное значение в процессах нагрева компонентов плазмы и появлении экстремумов на хвосте энергетического распределения электронов, наблюдавшегося с помощью прибора RPA.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Потоки электронов, измеренные приборами RPA в эксперименте "АРАКС", формировались в полях затухающих электростатических колебаний в плазме, возмущенной инъекцией электронных импульсов в ионосферу. Важную роль в динамике электронных потоков играли электростатические колебания электронного компонента и немонотонное расслоение плазменной неоднородности [Ижовкина и др., 2001]. Исчезновение экстремумов интенсивности электронных потоков на хвосте распределения электронов по энергии $V_R > 200$ В и самого хвоста распределения с уменьшением высоты ниже 130 км связано с подавлением электростатических колебаний ионного и электронного компонентов плазмы при столкновениях заряженных частиц с компонентами ионосферы, по-видимому, преимущественно с нейтралами. Рост плотности нейтралов с уменьшением высоты может быть основной причиной изменения динамики измеренных электронных потоков в зависимости от высоты. Поляризационный дрейф заряженных частиц в полях электростатических возмущений усиливает нейтрализацию заряда ракеты, эффективно увеличивает поверхность сбора нейтрализующего заряда поперек геомагнитного поля. Важную роль при этом играет ионный компонент плазмы. Ионные потоки при поляризационном дрейфе могут быть на 2–3 порядка величины больше электронных. Электростатические колебания в плазме в околоракетной области и поляризационный дрейф способствуют понижению потенциала ракеты во время инъекции электронных импульсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Ижовкина Н.И., Карпачев А.Т., Прутенский И.С., Пулинец С.А., Клос З., Роткель Х.* Процессы нагрева и распада неоднородностей в электростатически неустойчивой плазме верхней ионосферы // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 41. № 4. С. 491–494. 2001.
- *Cambou F., Dokukine V.S., Lavergnat J., Pellat R., Reme H., Saint-Marc A., Sagdeev R.Z., Zhulin I.A.* General description of the ARAKS experiments // Ann. de Geophysique. Т. 36. № 3. P. 271–283. 1980.
- *Gringauz K.I., Shutte N.M.* The study of electron fluxes with energy < 3 keV in the ARAKS experiment of January 26, 1975 // Ann. de Geophysique. Т. 36. № 3. P. 381–388. 1980.
- *Gringauz K.I., Musatov L.S., Shutte N.M., Beliashin A.P., Denstchikova L.I., Kopilov V.A.* A device for determination of the electrical potential of a rocket carrying an electron gun // Space Sci. Instrumentation. V. 4. № 2–3. P. 205–212. 1978.
- *Dechambre M., Gusev G.A., Kushnerevsky Yu.V., Lavergnat J., Pellat R., Pulinets S.A., Selegey V.V., Zhulin I.A.* High frequency waves during the ARAKS experiments // Ann. de Geophysique. Т. 36. № 3. P. 333–339. 1980a.
- *Dechambre M., Kushnerevsky Yu.V., Lavergnat J., Pellat R., Pulinets S.A., Selegey V.V.* Waves observed by the ARAKS experiments: the whistler mode // Ann. de Geophysique. Т. 36. № 3. P. 341–349. 1980b.
- *Dechambre M., Lavergnat J., Pellat R.* Waves observed by the ARAKS experiments: the VLF range // Ann. de Geophysique. Т. 36. № 3. P. 351–356. 1980c.
- *Hess W.N., Trichel M.C., Davis T.N., Beggs W.C., Kraff G.E., Stassinopoulos E., Naier E.J.R.* Artificial aurora experiment: experiment and principal results // J. Geophys. Res. V. 76. № 25. P. 6067–6092. 1971.
- *Lavergnat J., Dechambre M., Pellat R., Kushnerevsky Yu.V., Pulinets S.A.* Waves observed by the ARAKS experiments: generalities // Ann. de Geophysique. Т. 36. № 3. P. 323–332. 1980a.
- *Lavergnat J., Le Queau D., Pellat R., Roux A.* Nonlinear mechanism for the production of the low frequency electrostatic waves // Ann. de Geophysique. Т. 36. № 3. P. 439–442. 1980b.
- *Le Queau D., Pellat R., Saint – Marc A.* An investigation of the electrostatic linear instabilities of a radially limited electron beam // Ann. de Geophysique. Т. 36. № 3. P. 433–437. 1980.
- *Morozov A.I., Chusov I.V., Pokrovsky I.B., Ryabchikova L.V., Petrov E.M., Dokukine V.S., Ruzhin Yu. Ya.* Caesium plasma source for the ARAKS experiment // Space Sci. Instrumentation. V. 4. № 2–3. P. 251–252. 1978.
- *Paton B.E., Dudko V.N., Bernadsky V.N., et al.* A powerful electron accelerator for active space experiments // Space Sci. Instrumentation. V. 4. № 2–3. P. 131–138. 1978.
- *Winckler J.R.* An investigation of wave particles interactions and particle dynamics using electron beams injected from sounding rockets // Space Sci. Rev. V. 15. P. 751–780. 1974.