

УДК 533.9

ИССЛЕДОВАНИЕ МАЛОЭНЕРГИЧНОЙ ПЛАЗМЫ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ НА ХВОСТОВОМ И АВРОРАЛЬНОМ ЗОНДАХ. АППАРАТУРА И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

© 1998 г. В. В. Безруких*, Н. А. Барабанов**, Ю. И. Венедиктов**, В. И. Жданов*, В. И. Ивченко***, Г. А. Котова*, Л. А. Лежен*, С. А. Оржинский**, В. И. Прохоренко*

* Институт космических исследований РАН, г. Москва

** Одесский политехнический университет, Украина

*** Киевский университет им. Т. Г. Шевченко, Украина

Поступила в редакцию 10.07.97 г.

В настоящей статье приводятся краткое описание и параметры аппаратуры АЛЬФА-3, установленной на *Хвостовом* и *Авроральном* зондах для локальных измерений характеристик и исследования пространственного распределения малоэнергичной плазмы в магнитосфере Земли, начатые во время полетов космических аппаратов *Луна-2, 3* [1, 2], а также некоторые предварительные результаты, полученные при помощи этой аппаратуры в плазмосфере и вне ее на средних и высоких широтах.

АППАРАТУРА

На *Хвостовом* и *Авроральном* зондах был установлен прибор АЛЬФА-3, предназначенный для измерения характеристик и энергетических спектров потоков ионов с энергиями 0–25.5 эВ и исследования пространственного распределения холодных ионов в магнитосфере Земли.

В состав прибора АЛЬФА-3 входят следующие блоки:

- плоский электростатический анализатор с тормозящим потенциалом типа ПЛ-48 (РРА), смонтированный на корпусе регистрирующего усилителя постоянного тока;

- плоский электростатический модуляционный анализатор типа ПЛ-19 (МРА) с вмонтированным в специальный отсек корпуса анализатора квазирезонансным усилителем, настроенным на частоту модуляции;

- электронный блок АП-3, обеспечивающий необходимые режимы работы анализаторов и обмен сигналами со служебными системами спутника.

На каждом спутнике оба анализатора были установлены на затененной от Солнца поверхности и ориентированы в антисолнечном направлении. Нормали к поверхности входных отверстий каждого из анализаторов были параллельны оси вращения спутников. Если пренебречь отклонением оси вращения спутников от направления на Солнце, величина которого могла составлять несколько градусов, то с учетом ширины угловой диаграммы анализаторов можно считать, что в полете каждый из них был ориентирован по оси $-X$ солнечно-эклиптической системы координат. Размещение анализаторов в затененной от Солнца час-

ти пространства исключило прямое воздействие солнечного ультрафиолета на их показания.

На рис. 1а показана электрическая схема анализатора ПЛ-48. Входная сетка 1 и экранные сетки 3, 4 соединены с корпусом анализатора. Супрессорная сетка 5 поддерживается под потенциалом -40 В. На анализирующий электрод 2, выполненный из двух сеток, подается анализирующее напряжение $U_a = 0-25.5$ В.

Все сетки изготовлены из никелированной вольфрамовой проволоки диаметром 0.02 мм. Коллектор К, выполненный из никелевой пластины толщиной 0.5 мм, поддерживается под потенциалом -20 В. Потенциалы всех электродов отсчитываются относительно корпуса анализатора.

Вольт-амперная характеристика анализатора ПЛ-48 – зависимость тока анализатора от потенциала U на анализирующей сетке и угла атаки (угла A между направлением потока ионов и нормалью ко входному отверстию) приводится на рис. 1б. Токи нормированы на величину тока при $A = 0^\circ$, потенциалы – на E/e , где E – энергия пучка ионов, e – заряд электрона.

Основные технические данные анализатора ПЛ-48:

Диапазон энергий измеряемых потоков –	0–25.5 В;
Число энергетических интервалов –	24;
Ширина энергетического интервала –	0.1–3.2 эВ;
Диапазон измеряемых потоков –	10^5-10^9 см $^{-2}$ с $^{-1}$;
Эффективная площадь коллектора –	10.56 см 2 ;
Ширина угловой диаграммы –	$\pm 60^\circ$;
Время измерения каждого спектра –	1.8 с.

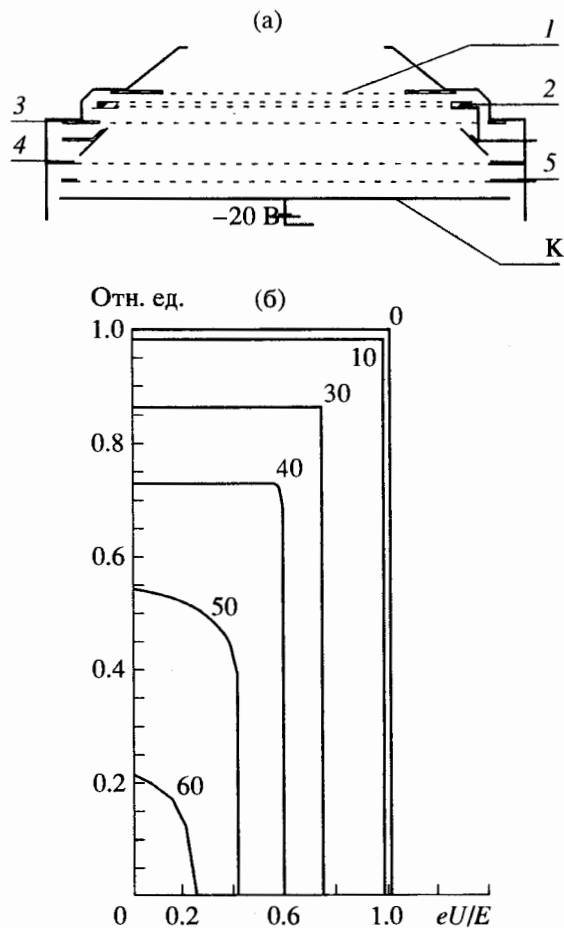


Рис. 1. а – схема анализатора ПЛ-48; б – вольт-амперная характеристика анализатора ПЛ-48 – зависимость тока анализатора от потенциала U на анализирующей сетке и угла атаки (угла A между направлением потока ионов и нормалью ко входному отверстию анализатора).

Следует отметить, что в полете регистрируется изменение тока коллектора анализатора ПЛ-48 при изменении потенциала на его анализирующей сетке и таким образом на выходе анализатора формируется не кривая торможения, иногда называемая интегральным спектром, а дифференциальный спектр. Одновременно с измерением энергетического спектра измеряется суммарный поток заряженных частиц в цепи коллектора анализатора. Коллектора К анализатора ПЛ-48 могут достигать ионы с $E > U_{КА}$ ($U_{КА}$ – положительный потенциал космического аппарата) и электроны с $E > 40$ эВ при условии, что отрицательная величина $U_{КА} < 40$ эВ.

Схема модуляционного анализатора ПЛ-19 представлена на рис. 2а. Входное отверстие анализатора затянуто сеткой 1. В рассматриваемом эксперименте сетка 1 гальванически соединена с корпусом анализатора. Система электродов 2 предназначена для изменения угловой диаграм-

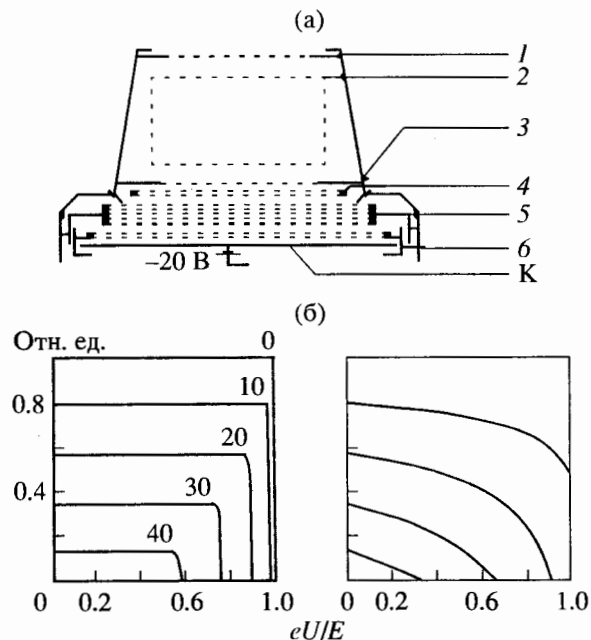


Рис. 2. а – схема анализатора ПЛ-19; б – вольт-амперные характеристики анализатора ПЛ-19.

мы анализатора. В ходе эксперимента электрод 2 поочередно подключается либо к корпусу анализатора, либо к анализирующему электроду 4 через делитель напряжения. Экранная сетка 3 и экранный пакет 5 соединены с корпусом анализатора. Экранный пакет, состоящий из 5 соединенных между собой сеток, обеспечивает полную электростатическую изоляцию анализирующей сетки 4 от коллектора К. На рис. 2б приводятся вольт-амперные характеристики анализатора ПЛ-19 для обоих вариантов подключения электрода 2.

Для модуляционного анализатора ПЛ-19 диапазон энергий измеряемых потоков, количество энергетических интервалов, их ширина и диапазон измеряемых потоков, а также время измерения спектра совпадают с аналогичными величинами для анализатора ПЛ-48. Ширина угловых диаграмм в первом и втором режимах работы анализатора ПЛ-19 соответственно составляет $\pm 50^\circ$ и $\pm 40^\circ$. Эффективная площадь коллектора К равна 11.3 см^2 .

Полный телеметрический кадр прибора АЛЬФА-3 содержит три энергетических спектра: один спектр, измеренный анализатором ПЛ-48 и два спектра, измеренных анализатором ПЛ-19 в двух режимах ($U_2 = 0 \text{ В}$ слева, $U_2 = 0.9U_a$ справа).

Измерение энергетических спектров анализатором ПЛ-48 выполняется в следующей последовательности:

– осуществляется определение наличия измеримого по величине потока ионов с энергиями $0-25.5$ эВ;

– в случае обнаружения потока ионов в указанном диапазоне энергий измеряется величина подаваемого на анализирующую сетку напряжения U_b , при котором анализатор начинает регистрировать приращение тока при изменении анализирующего напряжения. Напряжение U_b , определяющее положение спектра потока ионов на оси энергий, может изменяться в пределах 0–25.5 В с шагом 0.1 В. На анализирующую сетку анализатора подается суммарное напряжение $U_a = U_b + U_s$, где U_s – сканирующее напряжение, изменяющееся от 0 В до 25.5 В. Величина напряжения U_a не превышает 25.5 В. Сканирующее напряжение U_s сгруппировано в 6 групп, по 4 ступени в каждой группе. В первой группе сканирующее напряжение меняется с шагом 0.1 В. В каждой последующей группе сканирующее напряжение удваивается. В последней группе шаг сканирующего напряжения составляет 3.2 В. При этом при каждом значении анализирующего напряжения измеряются токи в цепи коллектора анализатора. Измерение спектра заканчивается или по уменьшению величины измеряемого тока ниже предела чувствительности, или по достижении анализирующим напряжением величины $U_a = U_b + U_s = 25.5$ В, после чего начинается измерительный цикл анализатора ПЛ-19;

– если в процессе сканирования по энергиям коллекторный усилитель ПЛ-48 тока не регистрирует, то измерения также начинает анализатор ПЛ-19.

Измерения при помощи анализатора ПЛ-19 производятся по аналогичному алгоритму, только анализирующее напряжение в этом случае $U_a = U_b + U_s + U_m$, где U_m – модулирующее напряжение прямоугольной формы с частотой 500 Гц, полный размах которого равен разности текущего и последующего значений U_s . При указанном выборе величин модулирующего напряжения анализатор ПЛ-19 также регистрирует дифференциальные спектры.

При измерении энергетического спектра каждым анализатором в телеметрическую систему передаются следующие величины:

- условный код каждого анализатора;
- величина напряжения U_b , определяющая положение спектра потока ионов на оси энергий;
- величина тока в каждом энергетическом интервале;
- номер шкалы усилителя тока.

Кроме того, в телеметрическую систему передается величина и знак полного тока коллектора анализатора ПЛ-48 при $U_a = 0$ В.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ниже приводятся и обсуждаются типичные для периода сентябрь–октябрь 1996 г. результаты измерений, полученные при помощи анализатора ПЛ-19 на *Авроральном зонде* в период 9.IX–14.IX.96 г. Отдельно будут рассмотрены результаты измерений в плазмосфере, в области, примыкающей к плазмопаузе снаружи, и на геоцентрических расстояниях $\sim 4R_E$ над полярной шапкой.

Измерения в плазмосфере и экзоплазмосфере. На рис. 3 показаны результаты измерения потоков ионов в интервале энергий 0–25.5 эВ с 08.40 UT до 23.50 UT 14.IX.96 г. в зависимости от Всемирного времени. Максимальные потоки, величины которых достигают значений 2×10^9 – 5×10^9 см⁻² с⁻¹, измерены в районе перигея орбиты. Резкие флуктуации ионных потоков, наблюдающиеся в ~ 10.00 UT и особенно в ~ 16.00 UT, объясняются пролетом зонда через область высоких широт и полярной шапки и связаны с флуктуациями там концентрации холодной плазмы. Из рис. 3 также видно, что плавное изменение величин измеряемых потоков до и после прохождения *Авроральным зондом* перигея (во время пролета зонда через плазмосферу) каждый раз сопровождается резким уменьшением величины измеряемых потоков. Уменьшение потоков может быть объяснено пересечением зондом плазмопаузы. Положения плазмопаузы, определенные по резкому уменьшению или увеличению регистрируемого прибором потока ионов, отмечены на рис. 3 стрелками, а соответствующие положения плазмопаузы значения L – координаты и местного времени отмечены на нижней оси. Положения плазмопаузы, зарегистрированные 14.IX.96 прибором АЛЬФА-3, соответствуют фазе заполнения плазмосферы ионосферной плазмой после ее опустошения, по-видимому, произошедшего в процессе двух интенсивных суббурь 12.IX.96 и 13.IX.96, когда максимальное значение $K_p - K_{pm}$ составило 5₋ и 5₀ соответственно.

Данные, представленные на рис. 3, позволяют оценить скорость заполнения плазмосферы и связанное с заполнением перемещение плазмопаузы на более удаленные L – оболочки: в течение 18 часов измерений плазмопауза в полуденном секторе переместилась с $L = 3.2$ на $L = 3.7$, а в полуденном секторе – с $L = 3.8$ до $L = 4.1$.

За пределами плазмосферы (в области магнитосферы, находящейся между плазмосферой и плазменным слоем и получившей в последнее время название “экзоплазмосфера”) прибор регистрирует сильно флуктуирующие потоки ионов, величины которых, как правило, изменяются в пределах 2×10^6 – 3×10^7 см⁻² с⁻¹, и лишь иногда вблизи апогея при $R = 4R_E$ и $L > 9$ достигают величин 10^8 – 10^9 см⁻² с.

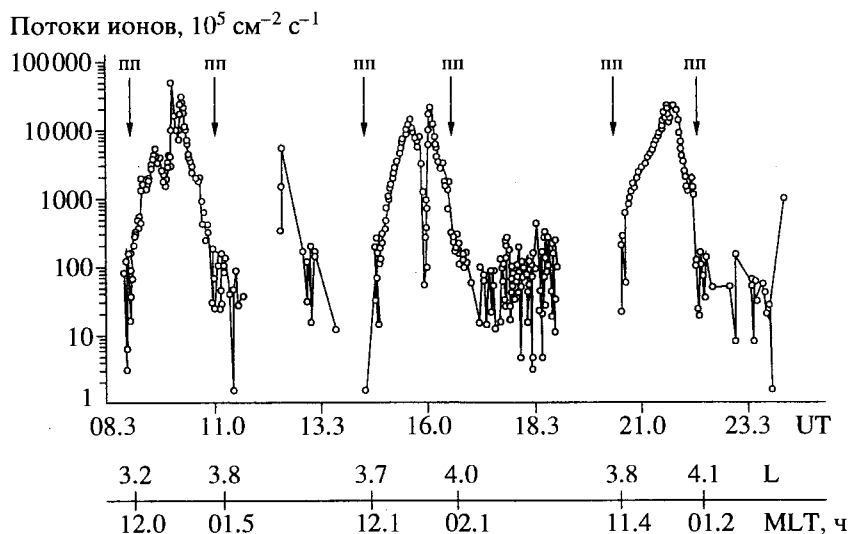


Рис. 3. Величины потока ионов, измеренные 14.IX.96 на трех последовательных орбитах Аврорального зонда.

Прежде, чем перейти к рассмотрению результатов спектральных измерений потоков холодных ионов, мы считаем нужным остановиться на проблеме зависимости результатов измерений малоэнергичной плазмы от собственного потенциала космического аппарата. Влияние потенциала КА на результаты измерений холодной плазмы выражается, с одной стороны, в изменении вблизи аппарата локальной концентрации заряженных частиц с энергиями $E \sim eU_{КА}$, где $U_{КА}$ — потенциал КА [3, 4], с другой — приводит к сдвигу измеренных энергетических спектров по оси энергий. Положительный потенциал сдвигает спектр в сторону меньших энергий, отрицательный — в сторону больших. Более того, следствием положительного потенциала КА, величина которого составляет $U_{КА} \sim (3-5)kT/e$ (здесь k — постоянная Больцмана, T — температура в абсолютной шкале, e — заряд электрона) или 1–3 В, может явиться эффект так называемой “скрытой” плазмы [5]. Эффект скрытой плазмы состоит в том, что реально существующая вблизи КА, обладающая положительным потенциалом относительно окружающей среды, холодная плазма остается “невидимой” для приборов, установленных на нем. Известно, что потенциал КА формируется, главным образом, под воздействием потоков заряженных частиц и электромагнитных излучений, воздействующих на него. Известно также, что $U_{КА}$ зависит от многих “технологических” факторов: материала корпуса КА, обработки и состояния его поверхности, типа покрытия и т.п. Как показывают теоретические оценки и экспериментальные данные, полученные в ходе многих экспериментов в ионосфере и плазмосфере [4], величины $U_{КА}$ обычно изменяются от долей до нескольких вольт, а его знак — отрицательный.

По мере перемещения КА по направлению к плазмосфере, модуль $U_{КА}$ уменьшается и вблизи плазмосферы он близок к 0 В. За пределами плазмосферы, но вблизи нее величины $U_{КА}$ также невелики, его знак чаще положителен. Например, потенциал геостационарных спутников *GEOS* и *SCATHA* согласно [6] составлял около +3 В, потенциал *GEOS* варьировался в пределах +3–+8 В, потенциал спутника *ISEE* был положительным в солнечном ветре, переходном слое и в магнитосфере (вне плазмосферы) [7]. Однако, в плазменном слое $U_{КА}$ может становиться отрицательным и достигать значительных величин. На спутниках *ATS-5,6*, *SCATHA*, когда они находились в конусе земной тени, были зарегистрированы потенциалы, величины которых достигали нескольких килоэлектронвольт [4, 8].

Поверхность Аврорального зонда была металлизирована, что исключило возникновение эффекта т. н. дифференциальной зарядки поверхности КА. Как показывает предварительный анализ энергетических спектров холодной плазмы, измеренных в период 09.IX–11.IX.96 г., в плазмосфере $U_{КА}$ был близок к 0 В. Во всяком случае его величина не превосходила 0.5 В, а знак был, как правило, отрицательным.

На рис. 4 показан ряд дифференциальных энергетических спектров потоков ионов, измеренных прибором АЛЬФА-3 на нисходящем участке орбиты 14.IX.96 г. в процессе движения Аврорального зонда в экзоплазмосфере, на плазмосфере и в плазмосфере с 09.03 UT по 09.29 UT в полуденном секторе магнитосферы. День 14.IX.96 г. характеризуется умеренной геомагнитной возмущенностью, когда $K_{pm} = 3$ (K_{pm} — максимальное значение K_p — индекса в день измерений), однако 13.IX.96 $K_{pm} = 5_-$, а 12.IX.96 $K_{pm} = 5_+$.

14 сентября 1996

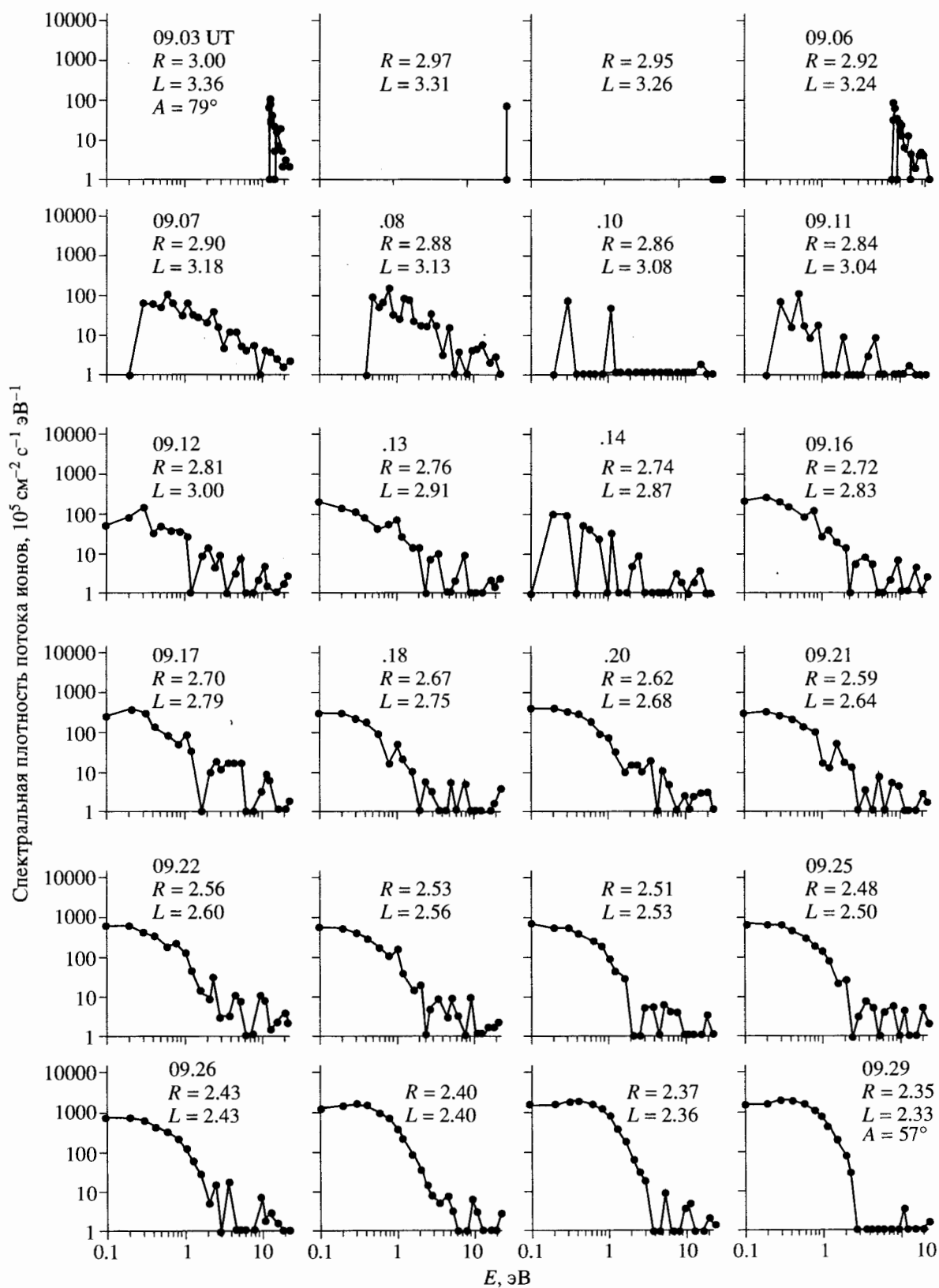


Рис. 4. Энергетические спектры, измеренные вне плазмосферы (09.03–09.06 UT) и в плазмосфере (09.07–09.29 UT).

В связи с этим можно полагать, что измерения 14.IX.96 происходили в процессе заполнения силовых трубок ионосферной плазмой после их опустошения в результате интенсивных суббурь, произошедших 12.IX–13.IX.96 г. Скорость спутника в указанный период $4.1 < V_{КА} < 5.4$ км с⁻¹, угол атаки A (угол между нормалью к входному отверстию анализатора и направлением полета спутника) изменялся от 78° при измерении спектра в 09.03 UT до 57° при измерении спектра в 09.29 UT. На каждом спектре, изображенном на рис. 4, приводится время начала измерения каждого спектра, соответствующие ему геоцентрическое расстояние R_E и L -координата. На первом и последнем спектрах приводятся также значения угла атаки A . Результаты измерений, приведенные на рис. 4, позволяют сделать следующие выводы:

– в интервале 09.03–09.06 UT анализатор регистрирует ионные потоки только с $E > 9$ эВ, их величина колеблется от 10^5 до 10^7 см⁻² с⁻¹ эВ⁻¹;

– между 09.06 и 09.07 UT величина потока ионов с энергией $E < 25.5$ эВ скачком увеличивается до 10^8 см⁻² с⁻¹ эВ⁻¹, при этом максимумы спектров перемещаются на $E < 1$ эВ. Указанные резкие изменения величины потока и положения спектра на оси энергий, произошедшие между 09.06 и 09.07 UT, объясняются пересечением спутником плазмопаузы и являются типичными для пересечения *Хвостовым* и *Авроральным зондами* плазмопаузы в ночном, утреннем и дневном секторах магнитосферы.

Как следует из предыдущего, сдвиг максимума измеренных спектров потоков ионов в сторону больших энергий при переходе из плазмосферы в экзоплазмосферу не может быть объяснен понижением $U_{КА}$ до -20 эВ. Поэтому причиной сдвига максимума спектра в сторону больших энергий при пересечении плазмопаузы на восходящих участках орбит, может служить увеличение энергии направленного движения малоэнергичной плазмы с нормальной ко входному отверстию компонентой скорости. Учитывая, что анализаторы, установленные на *Хвостовом* и *Авроральном зондах*, ориентированы в антисолнечном направлении, потоки малоэнергичных ионов имеют компоненту скорости V_x в солнечно-эклиптической системе координат, соответствующую энергии $9 \leq E \leq 25.5$ эВ. Мы полагаем, что за пределами плазмосферы прибор АЛФА-3 регистрирует потоки малоэнергичных ионов с $9 \text{ эВ} < E < 25 \text{ эВ}$, по-видимому, участвующих в крупномасштабной магнитосферной конвекции, причем область, в которой регистрируются конвективные потоки малоэнергичной плазмы непосредственно примыкает к плазмопаузе. “Падающая” форма спектров, измеряемых вне плазмосферы, дает основание полагать, что рассматриваемые потоки ионов создаются ионами атмосферного происхождения.

Последний вывод находится в хорошем согласии с точкой зрения, согласно которой малоэнергичная плазма атмосферного происхождения широко распространена в магнитосфере Земли и является существенным компонентом крупномасштабных структур земной магнитосферы [10, 11]. Концентрация малоэнергичных ионов за пределами плазмосферы на низких и средних широтах составляет $1\text{--}3$ см⁻³, что удовлетворительно согласуется с результатами, полученными [6, 9, 12].

Из рис. 4 видно также, что внутри плазмосферы непосредственно после пересечения плазмопаузы, в интервале 09.07–09.17 UT ($3.18 > L > 2.79$) прибор регистрирует спектры, форма которых существенно отличается от максвелловского распределения. Начиная с 09.18 UT ($L < 2.75$), форма измеренных спектров удовлетворительно согласуется с максвелловским распределением.

Как показывает рассмотрение экспериментальных данных, полученных в течение сентября–октября 1996 г. при различных уровнях геомагнитной возмущенности, существование в плазмосфере области, примыкающей к плазмопаузе, в которой распределение ионов по энергиям существенно отличается от максвелловского, является, возможно, постоянной особенностью плазмосферы, хотя L – координата внутренней границы этой области может меняться в значительных пределах. Существование этой области, возможно, связано с процессами, описанными в [13, 14], сопровождающими заполнение геомагнитных трубок ионосферной плазмой после их опустошения в результате геомагнитных возмущений. Необходимо подчеркнуть вместе с тем, что, как сообщают авторы [15], на спутнике *DE-1* были получены данные, свидетельствующие о том, что через сутки после понижения уровня геомагнитной возмущенности новая ионосферная плазма, заполняющая ранее опустошенные силовые трубки, имела распределение по энергиям, близкое к максвелловскому.

Измерения на геоцентрических расстояниях $4R_E$ над полярной шапкой. Известно, что концепция полярного ветра была предложена Аксфордом [16] и Бэнксом и Хольцером [17] в 1968 г. Однако, по-видимому, первые измерения полярного ветра были сделаны только 12 лет спустя Хофманом и Додсоном [18]. Систематические же экспериментальные данные, относящиеся к полярному ветру, были получены на спутниках *DE*. Эти данные были положены в основу модели полярного ветра, которая известна под названиями “cleft ion fountain” и “geomagnetic mass spectrometer” [19, 20]. Авторы указанной модели рассмотрели поток полярного ветра, состоящий из смеси ионов – H^+ , He^+ и O^+ с учетом продольного (амбиполярного) и поперечного (конвекции) электрических полей в поле гравитации Земли. Согласно

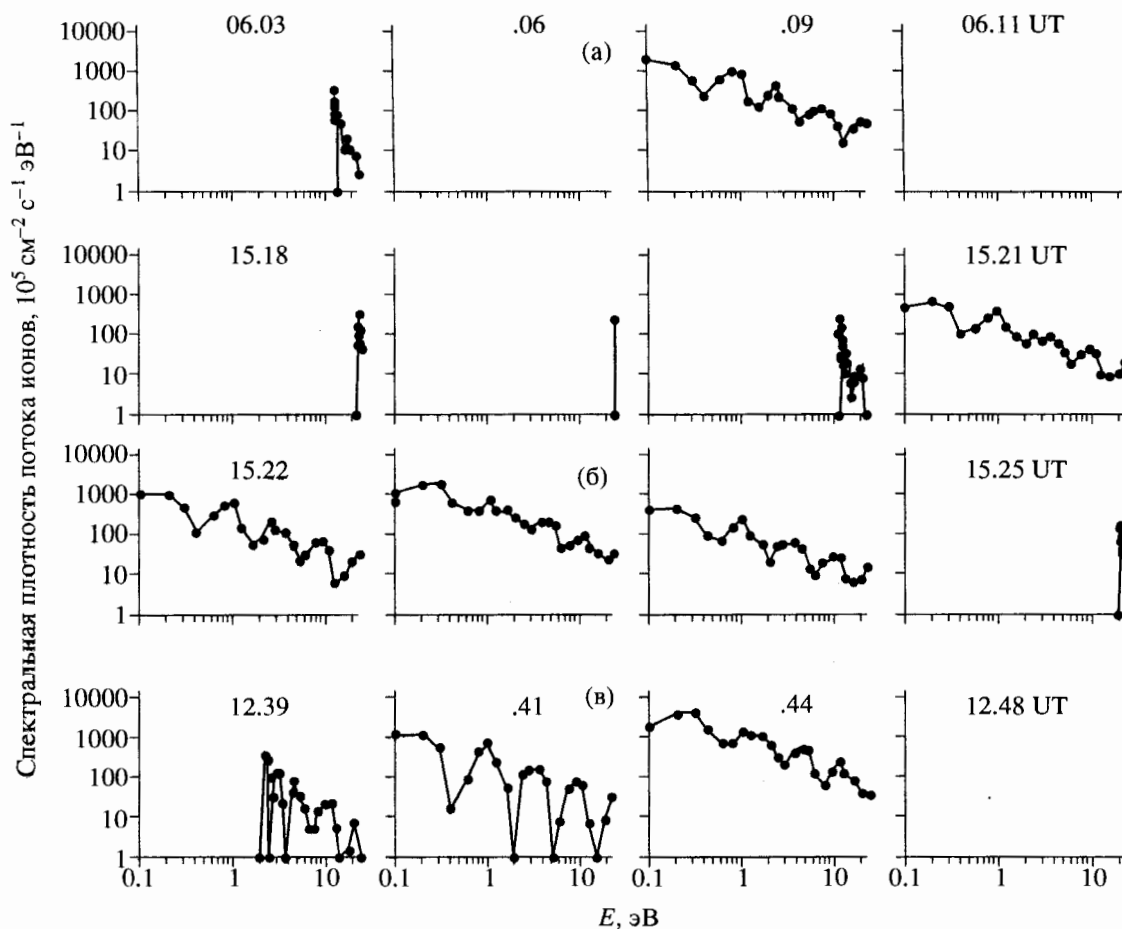


Рис. 5. Примеры “многокомпонентных” спектров, измеренных на $R_E = 4$ на высоких широтах.

а – 9.IX.96, 10.6–10.8 MLT, $R = 3.9R_E$, $L = 8.8–8.2$, $A = 134^\circ–130^\circ$.

б – 11.IX.96, 7.2–7.4 MLT, $R = 3.9R_E$, $L = 32–30$, $A = 110^\circ–115^\circ$.

в – 14.IX.96, 7.5–8.2 MLT, $R = 3.9R_E$, $L = 39–35$, $A = 172^\circ–180^\circ$.

рассматриваемой модели поток полярного ветра из ночного сектора, первоначально состоявший из смеси трех легких ионов, на высотах $\sim 1.5R_E$ начинает разделяться под действием гравитационного поля. Сначала от него отделяются потоки O^+ , выше – потоки He^+ , еще выше – потоки протонов. Потоки ионов O^+ попадают в ближайшую к Земле область плазменного слоя, потоки ионов He^+ – в более отдаленную и, наконец, в наиболее удаленной от Земли области плазменного слоя оказываются потоки протонов. К настоящему времени опубликовано значительное количество экспериментальных работ, в которых приводятся данные о регистрации в полярной ионосфере на высотах ~ 10000 км многокомпонентных потоков молекулярных ионов, см., например, [20].

Рассмотрим теперь результаты измерений энергетических распределений ионов, полученных вне плазмосферы, на геоцентрических расстояниях $\sim 3.9R_E$ ($L > 8.2$). Как мы уже отмечали,

вне плазмосферы прибор измерял ионные потоки $\sim 10^5–10^7$ $см^{-2} с^{-1}$ с энергией $\sim 10–20$ эВ. Однако из рис. 3 видно, что вблизи апогея ряда орбит *Аврорального зонда* прибор, как правило, регистрировал один или несколько спектров потоков ионов, с величиной потока $\sim 5 \times 10^7–5 \times 10^8$ $см^{-2} с^{-1}$. На рис. 5 представлены несколько дифференциальных энергетических спектров таких ионных потоков, зарегистрированных во время пяти пролетов *Аврорального зонда* вблизи апогея в предполуденном и утреннем секторах магнитосферы в период 09.IX–14.IX.96 г. Из рис. 5 можно видеть, что на $R_E = 3.9$ и $L > 8.2$ измерение энергетических спектров типичных по данным прибора АЛЬФА-3 для экзоплазмосферы ($F < 10^7$ $см^{-2} с^{-1}$, а энергия направленного движения $E > 20$ эВ) внезапно прерывается, а измеряется один или несколько спектров со многими четко выраженными максимумами с $F > 5 \times 10^7$ $см^{-2} с^{-1}$ и нормальной ко входному отверстию анализатора компонентой скорости направ-

Таблица

Дата 1996 г.	UT	R, R_E	L	MLT	K_{pm}	F_{He^+}/F_{H^+}	$F_{N^+ + O^+}/F_{H^+}$	$F_{N_2^+ + O_2^+ + NO^+}/F_{H^+}$	$F, 10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$
9. IX	6.09	3.9	8.6	10.7	2 ₋	0.48	0.22	0.06	3.1
11. IX	15.21					0.56	0.16	0.07	0.9
	15.22	3.9	30	07.4	5 ₋	0.48	0.16	0.06	1.5
	15.24					0.49	0.14	0.06	0.7
14. IX	12.41	4.0	37	07.6		0.53	0.13	0.06	1.5
	12.44	3.9	35	08.1	4 ₀	0.30	0.12	0.05	5.6
	18.43	3.9	15	07.1		0.49	0.11	0.06	0.4

ленного движения, соответствующей $E < 0.5$ эВ. После этого регистрация спектров с $E > 20$ эВ вновь возобновляется. Спектры, измеренные 09.IX.96 в 12.41 UT, 11.IX.96 – в 15.21–15.24 UT, 14.IX.96 – в 12.41, 12.44 и 18.43 UT, обладают одной общей характерной особенностью: отношения положений 1-го, 2-го, 3-го и 4-го максимумов по оси энергии в каждом спектре E_1, E_2, E_3 и E_4 близки к отношениям 1 : 4 : 16 : 32. Это обстоятельство может рассматриваться, как указание на то, что модуляционный анализатор прибора АЛЬФА-3, зарегистрировав изображенные на рис. 5 энергетические спектры с четырьмя максимумами, тем самым зарегистрировал ионный поток, состоящий из смеси ионов: $H^+, He^+, O^+ + N^+$ и $O_2^+ + N_2^+ + NO^+$. В таблице приводятся величины потоков ионов $He^+, N^+ + O^+, N_2^+ + O_2^+ + NO^+$, нормированные на величину потока ионов H^+ , и величины полных потоков, многокомпонентных спектров, представленных на рис. 5. В таблице данные о величинах парциальных потоков сопровождаются значениями Всемирного времени, геоцентрических расстояний, L -координаты, местного магнитного времени и максимальным значением K_p -индекса за сутки, предшествующие измерениям. Обращают на себя внимание хорошее совпадение парциальных потоков молекулярных ионов по данным прибора АЛЬФА-3 на Авроральном зонде и приборах SMS на спутнике EXOS-D [21] и значительное расхождение в величинах полного потока молекулярных ионов: $> 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ – в первом случае и $10^5 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ согласно [21].

Принимая во внимание, что все случаи регистрации многокомпонентных потоков на Авроральном зонде были выполнены на высоких широтах и геоцентрических расстояниях $\sim 4R_E$, эти потоки (как и потоки полярного ветра) следует отнести к магнитосферным феноменам, связанным с истечением плазмы из высокоширотной ионосферы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные данные, приведенные в настоящей статье, позволяют сделать следующие предварительные выводы:

1. Аппаратура АЛЬФА-3, содержащая анализатор с тормозящим потенциалом и модуляционный анализатор, является эффективным инструментом для измерения потоков малоэнергичных ионов в плазмосфере и вне ее. Аппаратура позволяет надежно определять момент пересечения спутником плазмопаузы по величине измеряемого потока и величине компоненты направленной скорости малоэнергичной плазмы, нормальной к входному отверстию анализатора.

2. Получено экспериментальное свидетельство существования примыкающей к плазмопаузе с внутренней стороны в полуденной и полуночной плазмосфере области, в которой распределения потоков малоэнергичных ионов по скоростям существенно отличается от максвелловского. По предварительным данным эта область может совпадать с геомагнитными трубками, которые заполняются ионосферной плазмой после их опустошения под действием магнитной суббури. Возможно, положение внутренней границы этой области совпадает с ближайшим к Земле положением плазмопаузы, которое последняя занимала в процессе развития суббури.

3. В области магнитосферы, непосредственно примыкающей к плазмопаузе, с внешней стороны систематически регистрируются потоки малоэнергичной плазмы с $9 < E < 25.5$ эВ, по-видимому, принимающие участие в магнитосферной конвекции.

4. На геоцентрических расстояниях $\sim 4R_E$ ($8 < L < 30$) в утреннем секторе магнитосферы в ряде случаев регистрировались энергетические спектры потоков ионов, обладающие несколькими максимумами, причем положения максимумов на оси энергий близко к соотношению 1 : 4 : 16 : 32, что позволяет предполагать, что над полярной

шапкой могут существовать в некоторых случаях многокомпонентные потоки ионов, содержащие ионы H^+ , He^+ , O^+ , O_2^+ + N_2^+ + NO^+ , причем их величины составляют $F > 5 \times 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Авторы статьи выражают благодарность М.И. Веригину за помощь при выполнении настоящей работы и полезные обсуждения и Ю.И. Гальперину – за полезные обсуждения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту 96-02-18486 и INTAS по проекту 94-1695.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грингауз К.И., Безруких В.В., Озеров В.Д. и др. Изучение межпланетного ионизованного газа, энергичных электронов и корпускулярного излучения Солнца при помощи трехэлектродной ловушки заряженных частиц на второй советской космической ракете // ДАН СССР. 1960. Т. 131. С. 1301–1304.
2. Gringauz K.I. The Structure of the Earth's Ionized Gas Envelope Based on Local Charged Particle Concentration Measured in the USSR. Space Res. 2 // Proc. of the 2-nd International Space Sci. Symp. N. Holland Publ. Co. 1961. P. 574–592.
3. Whipple E.C., Warnock J.M., Winckler R.H. Effect of Satellite Potential in Direct Ion Density Measurement Through the Plasmapause // J. Geophys. Res. 1974. V. 79. P. 179–186.
4. Whipple E.C. Potentials of Surfaces in Space // Rep. Prog. Phys. 1981. V. 44. P. 1197–1250.
5. Olsen R.C. The Hidden Ion Population of the Magnetosphere // J. Geophys. Res. 1982. V. 87. P. 3481–3488.
6. Knott K., Decreau P., Korth A. et al. Observations of the GEOS Equilibrium Potential and Its Relation to the Ambient Electron Energy Distribution // Proc. of the 17th ESLAB Symposium on "Spacecraft/Plasma Interaction...". Noordwijk. The Netherlands, Sept. 1983. (ESA SP-198, publ. Dec. 1983).
7. Lindqvist P.-A. The Potential of ISEE in Different Plasma Environment // *ibid.*
8. DeForest S.E. Spacecraft Charging at Geosynchronous Orbit // J. Geophys. Res. 1972. V. 77. P. 651–659.
9. Decreau P., Beghin C., Parrot M. Global Characteristics of the Cold Plasma in the Equatorial Plasmapause Region, as Deduced from GEOS-1 Mutual Impedance Probe // J. Geophys. Res. 1982. V. 87. P. 695–712.
10. Chappell C.R., Moore T.E., Waite J.H., Jr. The Ionosphere as a Fully Adequate Source of Plasma for the Earth's Magnetosphere // J. Geophys. Res. 1987. V. 92. P. 5896–5910.
11. Moore T.E. Origins of Magnetospheric Plasma // Rev. Geophys. Supplement. 1991. P. 1039–1048.
12. Moldwin M.B., Thomson M.F., Bame S.J. et al. The fine-scale structures of the outer plasmasphere // J. Geophys. Res. 1995. V. 100. P. 8021–8029.
13. Banks P.M., Nagy A.F., Axford W.I. Dynamic Behavior of Thermal Protons in the Mid-Latitude Ionosphere and Magnetosphere // Planet. and Space Sci. 1971. V. 19. P. 1053–1061.
14. Григорьев С.А. Процессы восстановления плазмосферы // Космич. исслед. 1991. Т. 29. С. 85–94.
15. Horwitz J.L., Comfort R.H., Chappel C.R. Thermal Ion Composition Measurements on the Formation of the New Outer Plasmasphere and Double Plasmapause During Storm Recovery Phase // Geophys. Res. Lett. 1984. V. 11. P. 701–704.
16. Axford W.I. The Polar Wind and the Terrestrial Helium Budget // J. Geophys. Res. 1968. V. 73. P. 6855–6863.
17. Banks P.M., Holzer T.E. The Polar Wind // J. Geophys. Res. 1968. V. 73. P. 6846–6858.
18. Hoffman J.H., Dodson W.H. Light ion Concentration and Fluxes in the Polar Regions During Magnetically Quiet Times // J. Geophys. Res. 1980. V. 85. P. 626–632.
19. Lockwood M., Chandler M.O. J.L., Horwitz M.O. et al. The Cleft Ion Fountain // J. Geophys. Res. 1985. V. 90. P. 9736–9748.
20. Horwitz J.L., Lockwood M. The Cleft Ion Fountain: A two-Dimensional Kinetic Model // J. Geophys. Res. 1985. V. 90. P. 9736–9748.
21. Yau A.W., Whalen B.A., Goodenough C., Sagava E. et al. EXOS D (Akebono) Observations of Molecular NO^+ and N_2^+ Upflowing Ions in the High-Altitude Auroral Ionosphere // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. P. 11205–11224.

Investigation of Low-Energy Plasma in the Earth's Magnetosphere on the Tail and Auroral Probes: Instrumentation and Tentative Results

V. V. Bezrukikh*, N. A. Barabanov**, Yu. I. Venediktov**, V. I. Zhdanov*, V. I. Ivchenko***, G. A. Kotova*, L. A. Lezhen*, S. A. Orzhinskii**, and V. I. Prokhorenko*

* Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Profsoyuznaya 84/32, Moscow, 117810 Russia

** Odessa Polytechnical University, Odessa, Ukraine

*** Shevchenko State University, ul. Glushkova 6, Kiev, 252127 Ukraine

We present a brief description and the parameters of the ALFA-3 instrument installed onboard the Tail Probe and Auroral Probe for local measurements of the characteristics of low-energy plasma and for a study beginning during the Luna-2 and Luna-3 missions [1, 2] of the spatial distribution of plasma in the Earth's magnetosphere. Some of the tentative results obtained with this instrument inside and outside the plasmasphere at middle and high latitudes are also discussed.