

УДК 533.9

КОМПОНЕНТЫ ТЕПЛОЙ И СВЕРХТЕПЛОЙ ПЛАЗМЫ ($E \leq 15$ эВ) В ВЫСОКОШИРОТНЫХ ОБЛАСТЯХ МАГНИТОСФЕРЫ НА ВЫСОТАХ $2-3R_E$ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ НА СПУТНИКЕ ИНТЕРБОЛ-2

© 2000 г. В. В. Афонин¹, О. С. Акевьева¹, Я. Шмилауэр²¹ Институт космических исследований РАН, г. Москва² Институт физики атмосферы, Прага, Чехия

Поступила в редакцию 30.03.2000 г.

Эксперимент КМ-7 на спутнике *ИНТЕРБОЛ-2* проводился с целью измерения электронной температуры T_e тепловой плазмы в периферийных областях плазмосферы и в авроральной зоне магнитосферы на высотах до $2-3$ радиусов Земли. Как показали результаты измерения T_e , предполагавшиеся при разработке прибора преобладание в рассматриваемой области максвелловского распределения электронов по энергиям оказалось в подавляющем большинстве случаев неверным. В связи с этим проведена обработка вольт-амперных характеристик сферического зонда, регистрировавшихся с целью проверки наличия максвелловского распределения электронов по энергиям. С этой целью применительно к условиям проведения эксперимента разработана численная модель зондовой характеристики. В результате ее применения впервые получены достоверные детальные данные о структуре тепловой плазмы в высокоширотной магнитосфере на высотах до 20 000 км. Приводится краткое описание модели и первые результаты.

ВВЕДЕНИЕ

На спутнике *ИНТЕРБОЛ-2* был установлен прибор КМ-7, предназначенный для измерения электронной температуры T_e тепловой плазмы в периферийных областях плазмосферы и в авроральной зоне магнитосферы на высотах до $2-3$ радиусов Земли. Измерения проводились при помощи датчика электронной температуры ДЭТ-П, являющегося модификацией зонда Ленгмюра [1].

В настоящее время данные по распределению электронов в рассматриваемой области чрезвычайно скудны и ограничиваются грубыми оценками T_e практически по порядку величины.

При разработке прибора КМ-7 предполагалось, что тепловые электроны в рассматриваемой области обладают максвелловским распределением. Вследствие ограниченности выделенной прибору ТМ-информации, бортовая программа обработки информации была настроена на определение величины T_e исходя из этого предположения. Для проверки этого предположения и поисков участков с немаксвелловским распределением проводились также измерения вольтамперных характеристик зонда (ВАХ).

Основной объем полученных со спутника *ИНТЕРБОЛ-2* данных относится к вычисленным на борту величинам T_e , передававшимся через основную ТМ-систему РТС. Характеристики ВАХ передавались через вспомогательную ТМ-систему СТО на станцию Панска Вес, Чехия, и только в режиме непосредственной передачи. В данном

эксперименте получена обширная информация по T_e за ~ 2.5 года с почти непрерывным временным перекрытием. Временное разрешение этой информации составляло, в зависимости от режима работы РТС, либо 5.12 с (около 80%), либо 16 с. Она содержит много интересных сведений о пространственно-временном распределении T_e в рассматриваемой области. Первые результаты по T_e приведены в [1]. Однако наряду с ВАХ, соответствующих максвелловскому распределению электронов, в определенных условиях наблюдались многочисленные случаи, когда форма ВАХ значительно отличалась от соответствующей максвелловскому распределению и ни при каких параметрах максвелловской тепловой плазмы не удавалось достичь приемлемого совпадения экспериментальной и вычисленной кривых.

Анализ детального хода T_e вдоль орбиты КА позволил предположить, что в большинстве случаев предположение о максвелловском распределении тепловой плазмы в рассматриваемой области неверно. С целью выяснения реальной ситуации в данной работе анализируются вольтамперные характеристики зонда и приводятся первые результаты по структуре распределений тепловой и сверхтепловой плазмы в высокоширотных областях магнитосферы на высотах $2-3R_E$. Анализ проводился при помощи численной модели зондовой характеристики, разработанной для условий проведения эксперимента КМ-7. В данной работе не приводится детальное описание модели, а лишь ее основные характеристики.

ИЗМЕРЕНИЯ

Благодаря особенностям выбранной орбиты, по крайней мере в начальный период полета, около 70% времени КА находился вне плазмосферы в полярной магнитосфере на высотах до ~20000 км.

Измерения проводились с момента первого включения 31.VIII.1996 г. и до января 1999 г. при каждом включении запоминающего устройства бортовой телеметрической системы РТС. Это дало возможность получить практически непрерывные измерения в течение около 2.5 лет; к концу этого периода перекрытие по времени ухудшилось.

В отличие от классического зонда Ленгмюра, в котором измеряется ток на зонд в зависимости от потенциала зонда $I_p(U_p)$, в данном методе путем приложения к зонду положительных и отрицательных токов смещения измеряется в.а.-характеристика плавающего зонда (ВАХ-ПЗ) – зависимость плавающего потенциала зонда от тока на зонд $U_{fp}(I_p)$. Этот метод фактически объединяет в себе достоинства классического и плавающего зондов – он использует плавающий режим и в то же время позволяет зарегистрировать в.а.-характеристику. Знание ВАХ позволяет контролировать достоверность измерения T_e , так как позволяет контролировать наличие (или отсутствие) максвелловского распределения электронов по энергиям.

Температура электронов T_e определялась на борту автоматически, запоминалась и передавалась на Землю в готовом (цифровом) виде. Бортовая программа работала на основе хорошо известного факта – при максвелловском распределении ВАХ зонда, построенная в полулогарифмическом режиме, имеет прямолинейный участок торможения электронов. Соответственно этому бортовая программа находила после логарифмирования численных значений тока зонда этот прямолинейный участок (по минимуму производной) и по величине наклона ВАХ вычисляла T_e .

Прибор КМ-7 имел два выхода – на штатную РТС КА и на вспомогательную ТМ-систему СТО. Вольт-амперные характеристики передавались только через систему СТО в режиме непосредственной передачи ввиду недостаточного объема ТМ-квоты в системе штатной РТС, выделенной прибору КМ-7.

Подробное описание работы прибора и первые результаты его работы, в основном по данным штатной ТМ-системы, приведены в [1].

При установке датчика ДЭТ-П были приняты меры по уменьшению влияния фотоэлектронов с поверхности элементов конструкции КА и самого датчика на результаты измерений. Как показано в [1], эти меры оказались достаточно эффективными. Влияние фотоэлектронов явным обра-

зом проявлялось только при отклонении ориентации оси вращения КА от номинальной в области перигея, когда происходила засветка датчика солнечным излучением. Во время рассматриваемого в данной статье периода перигей находился в противоположном от рассматриваемой области полушарии.

В связи с проблемой определения параметров ионных потоков на зонд (см. ниже) уместно упомянуть следующее. При проведении бортовой обработки, требующей, помимо выполнения обычных алгебраических операций, операции логарифмирования, первый шаг в измерении ВАХ заключался в смещении всей в.а.-характеристики в сторону электронных токов, чтобы исключить смену знака анализируемых величин на всем протяжении вольт-амперной характеристики. Смещение выполнялось путем приложения к зонду псевдо-электронного тока таким образом, чтобы произошла компенсация ионного тока при потенциалах зонда относительно КА в интервале -15...-20 В. Величина приложенного псевдо-электронного тока равна току ионов на зонд при указанных потенциалах. Параметр прибора КМ-7 U_2 , также передававшийся через СТО, является независимым определением величины этого (ионного) тока. Несмотря на то, что он, к сожалению, опрашивался слишком редко и в условиях быстрого изменения параметров среды не всегда адекватно отражал быстрые вариации, он может оказаться полезным при определении параметров ионных потоков на зонд.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для того, чтобы определить параметры тепловой плазмы по вольт-амперной характеристике зонда (ВАХ), необходимо подобрать величины этих параметров, характеризующих плазму, до наилучшего (по тому или иному критерию) совпадения с экспериментальными записями ВАХ. Для проведения такого подбора необходимо знать, помимо перечня подбираемых параметров плазмы, аналитическое выражение для зондовой характеристики $I_p(U_p)$ – зависимости тока I_p от потенциала зонда относительно плазмы U_p . При этом, поскольку любой зондовый прибор проводит измерения относительно единственного имеющегося “опорного” потенциала – потенциала корпуса КА относительно окружающей плазмы U_0 , необходимо независимо знать эту величину.

Проблема определения параметров плазмы по вольт-амперной характеристике является сложной задачей даже для простейшего случая тепловой изотропной плазмы. В случае движущейся плазмы, каковой она является всегда относительно прибора, установленного на КА, даже при отсутствии собственно плазменных движений, и особенно при наличии анизотропии и/или собст-

венных движений плазмы, задача чрезвычайно усложняется, о чем свидетельствует обширный перечень посвященных этой проблеме публикаций (см. перечень литературы в [2–4]). Авторы обзора [2] указывают, что даже при отсутствии магнитного поля проблема вычисления тока, собираемого зондами в плазме, является одной из наиболее труднопреодолимых в физике плазмы. Достаточно полные решения существуют только для очень простых геометрий в пределах больших или малых длин свободного пробега и при отсутствии эффектов движения.

Обычно в рассматриваемой области магнитосферы на больших высотах тепловая изотропная плазма характеризуется 7 параметрами – составом (тепловые электроны и ионы H^+ , He^+ и O^+), т.е. величинами концентраций $N_e, N_{ij}, j = 1-3$, температурой электронов T_e и ионов $T_{ij}, j = 1-3$. Состав характеризуется парциальными концентрациями ионов $p_{ij} = N_{ij}/N_e$ для разных массовых чисел ионов M_{ij} , в предположении электрической нейтральности $N_e = \sum N_{ij}, j = 1-3$.

Определение потенциала корпуса КА U_s является, по сути, такой же задачей, как и определение параметров плазмы по вольт-амперной характеристике зонда, примененной ко всему КА в целом (см. [5, 6] и в применении к рассматриваемой области [6]). Поэтому в задаче определения параметров плазмы по зондовым измерениям величина U_s включается в перечень подбираемых параметров.

Используемое для определения параметров плазмы методом подбора параметров аналитическое выражение для зондовой характеристики $I_p(U_p)$, т.е. аналитическая модель зонда, является ключевым элементом и представляет собой проблему, фактически строго не решенную вплоть до настоящего времени [2, 7]. В этой области имеется три в разной степени разрешенные проблемы – величина тока на зонд при нулевом относительно плазмы потенциале $I_0(U_p = 0)$ и поведение тока на зонд при отталкивающих ($I(U_p < 0)$) и при притягивающих ($I(U_p > 0)$) потенциалах. Наименее разрешенная проблема – поведение зондового тока при притягивающих потенциалах. Строгого аналитического выражения для $I(U_p > 0)$, применимого в практических исследованиях, не существует даже для простейших случаев системы зонд-плазма; имеются лишь приближенные выражения для некоторых конфигураций такой системы.

Таким образом, даже в простейшем случае тепловой изотропной плазмы строгое определение параметров плазмы математически сводится к задаче подбора 8 параметров в условиях не всегда корректной аналитической модели исследуемого объекта. Такая задача сложна сама по себе и получение приемлемой точности весьма про-

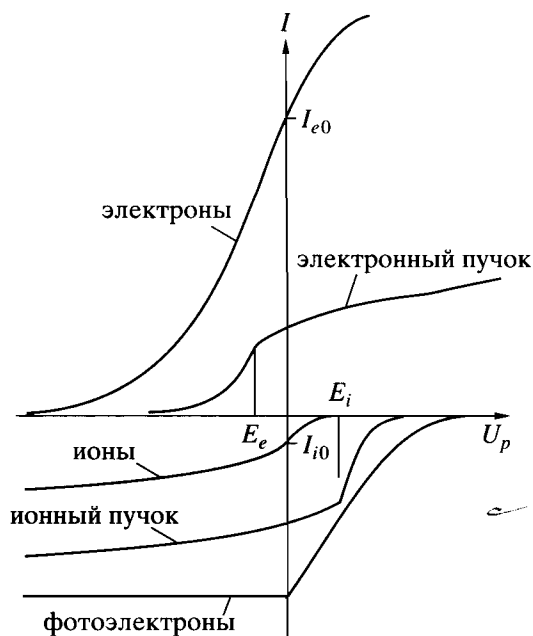


Рис. 1. Схематическое поведение различных компонент тока на зонд в зависимости от потенциала зонда относительно плазмы.

блематично, а в силу коррелированности некоторых пар параметров она становится неоднозначной, что требует либо введения соответствующих априорных предположений, либо независимого определения одного из таких параметров.

Тем не менее, при правильно выбранных параметрах системы и области изменения параметров, а также за счет введения ряда упрощающих предположений, не критичных в конкретно решаемой задаче, такие выражения обеспечивают приемлемую для практики точность определения подбираемых параметров.

МОДЕЛЬ И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Для анализа ВАХ и определения параметров тепловой и сверхтепловой плазмы в рассматриваемой области разработана численная модель зонда. На данном этапе предполагалось, что плазма состоит из следующих компонент:

- тепловая изотропная плазменная популяция (один сорт ионов H^+),
- электронный пучок, характеризуемый энергией направленного движения E_{eb} и тепловой энергией E_{etb} ,
- ионный пучок, характеризуемый энергией направленного движения E_{ib} и тепловой энергией E_{itb} .

На рис. 1 показано схематически поведение различных компонент тока на зонд в зависимости от потенциала зонда относительно плазмы. Каж-

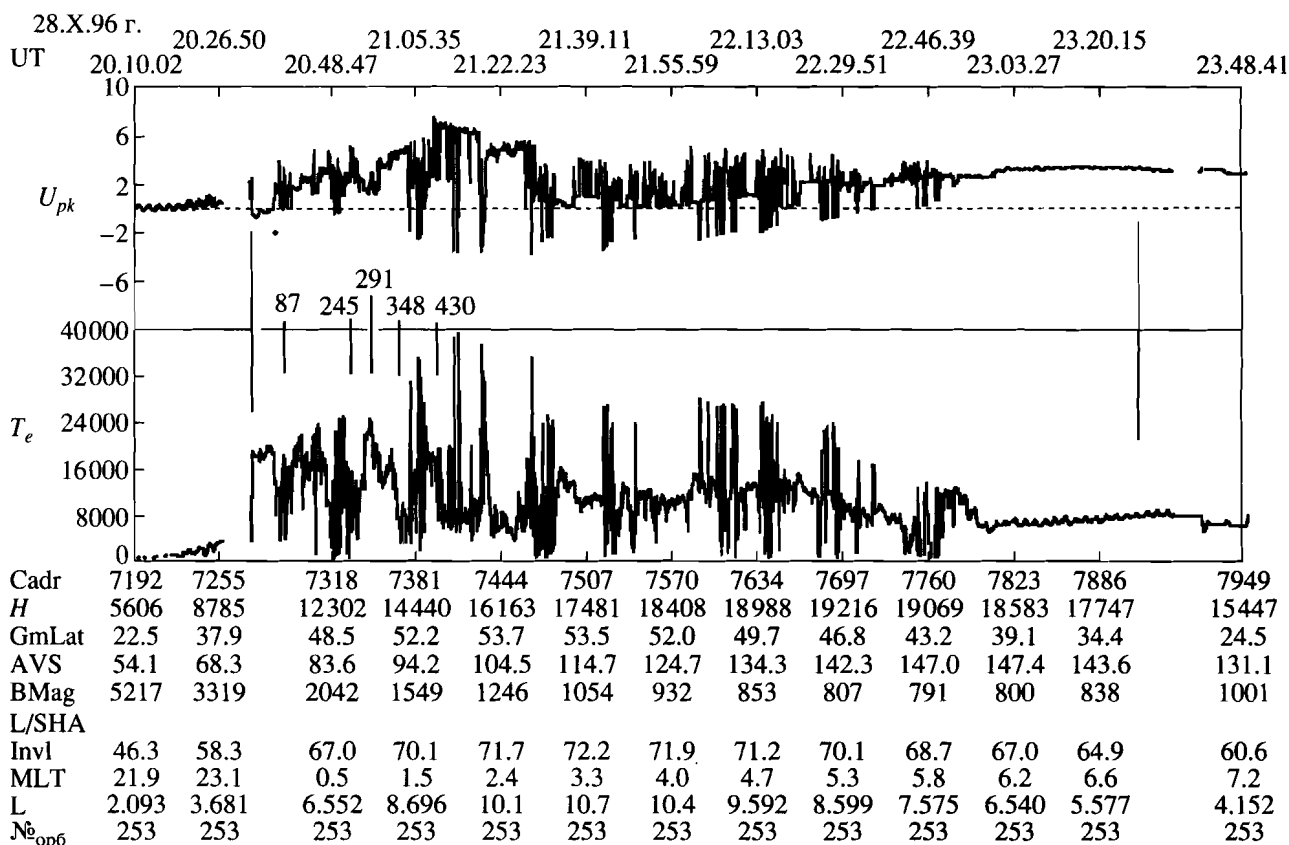


Рис. 2. Результаты измерений T_e с вычислением величины T_e на борту. Период измерений параллельно регистрировавшихся через СТО вольт-амперных характеристик отмечен вертикальными линиями. Моменты измерения ВАХ, результаты обработки которых приведены на последующих рисунках, отмечены штрихами с указанием номера ВАХ.

дая компонента тока имеет различные зависимости от потенциала для притягивающих и отталкивающих потенциалов. Кривые, обозначенные как “электроны” и “ионы”, представляют токи тепловой изотропной плазмы. Токи электронного и ионного пучков изменяют вид характерной зависимости от потенциала (начинают экспоненциально уменьшаться) при величинах потенциала зонда, превышающих по абсолютной величине энергию направленного движения E_e и E_i соответственно. Ток фотоэлектронов постоянен при отрицательных потенциалах и экспоненциально уменьшается при положительных. Зондовая характеристика представляет собой сумму кривых, соответствующих присутствующим в плазме компонентам. Отсюда очевидно большое многообразие возможных форм вольт-амперной характеристики зонда.

В качестве компонент тепловой плазмы ($E \leq 15$ эВ) модель может включать:

- 2 популяции тепловой изотропной плазмы,
- 2 пучка электронов,
- один пучок ионов,

– потенциал корпуса КА U_s , скорость дрейфа плазмы V_d .

В рамках рассматриваемой модели воздействие фотоэлектронов на данном этапе явным образом не учитывалось, поскольку меры по уменьшению влияния фотоэлектронов на измерения оказались, как указывалось выше, достаточно эффективными. Несмотря на это, полностью исключить влияние фотоэлектронов на измерения, по-видимому, нельзя (этот вопрос требует специального детального анализа). Во всяком случае, можно утверждать, что если такое влияние присутствует, то на сделанные в данной работе выводы оно не влияет.

Помимо перечисленных выше параметров учитывались различные эффективные площади собирания для ионов и электронов, разные модели слоя объемного заряда, скорость КА V_s и угол атаки θ (угол между направлением на Солнце и вектором скорости дрейфа плазмы V_d).

Таким образом, численная модель зонда включает более 20 параметров. При таком количестве параметров об автоматическом определении параметров не может быть и речи. Как оказалось, влияние некоторых из параметров существенно

23.48.41
7949
15447
24.5
131.1
1001
60.6
7.2
4.152
253
Регистрирование ВАХ, дрейфа ВАХ.

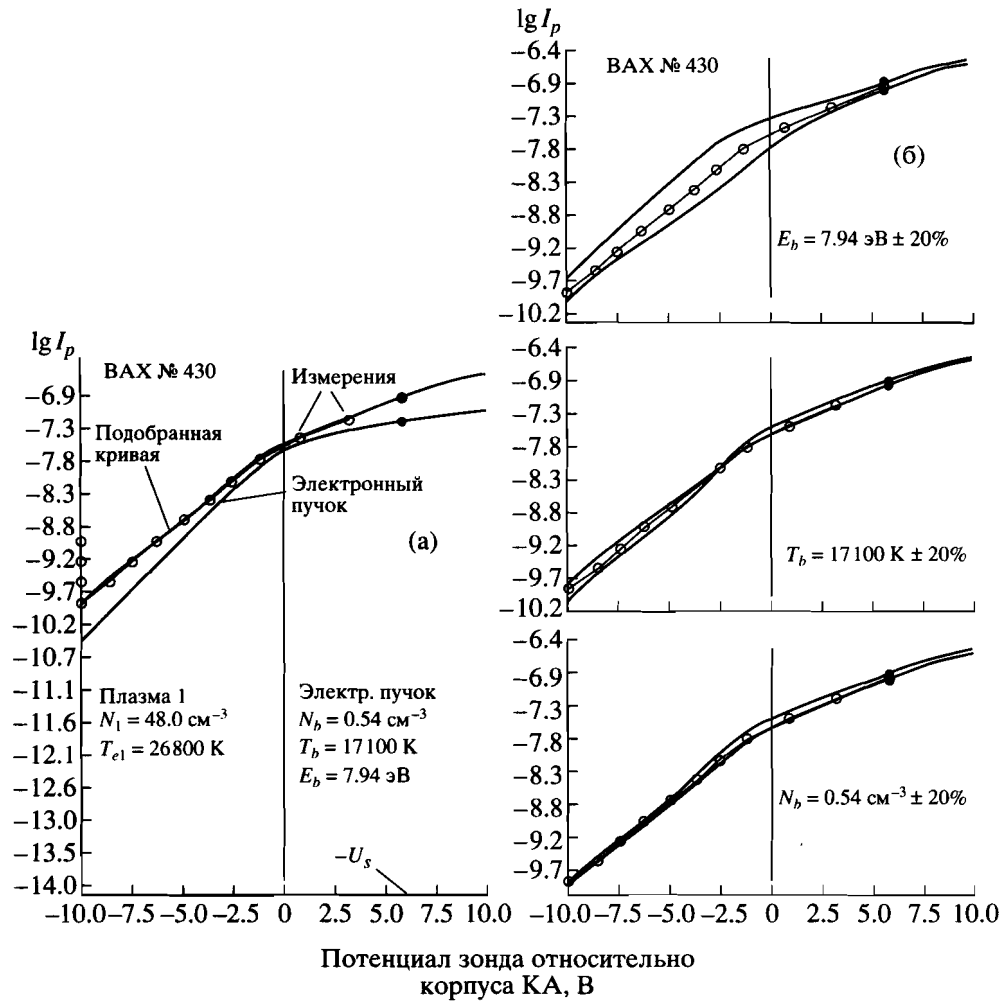


Рис. 3. (а) Результат обработки ВАХ № 430. (б) Оценки точности подбора параметров электронного пучка E_b , T_b и N_b для ВАХ № 430.

ниже по сравнению с влиянием "основных" параметров (концентрации, температуры электронов и энергии пучков). Такое большое количество подбираемых параметров необходимо для приемлемого описания достаточно сложных конфигураций плазмы в рассматриваемой области (2 тепловых популяции + 2 электронных пучка + 1 ионный пучок = $2TR + 2EB + 1IB$). В большинстве случаев конфигурация плазмы оказалась намного проще и для ее описания требовалось значительно меньшее, зависящее от конкретной характеристики ВАХ, количество подбираемых параметров. Оказалось также, что T_i и V_d мало влияют на результаты подбора, поскольку эти параметры влияют в основном на начальный участок ВАХ (при отрицательных потенциалах зонда). Поэтому приводимые результаты были получены в предположениях изотермичности изотропных плазменных популяций ($T_i = T_e$) и отсутствия

дрейфа плазмы как целого ($V_d = V_s$) путем визуального подбора по соответственно меньшему количеству параметров.

Визуальный подбор проводился в интерактивном режиме для каждой конкретной характеристики ВАХ. Эффективность подбора облегчалась тем, что для каждой из 4 характерных частей зондовой характеристики (участки ускорения и торможения для ионов и электронов) имеется вполне однозначное влияние каждого из основных подбираемых параметров на форму кривой (параметры, незначительно влияющие на результаты, были исключены из подбора). Фактически подбор происходил путем суммирования нескольких кривых с известной зависимостью от подбираемых параметров и графической подгонкой формы суммарной кривой к экспериментальной кривой с визуальной оценкой качества подбора.

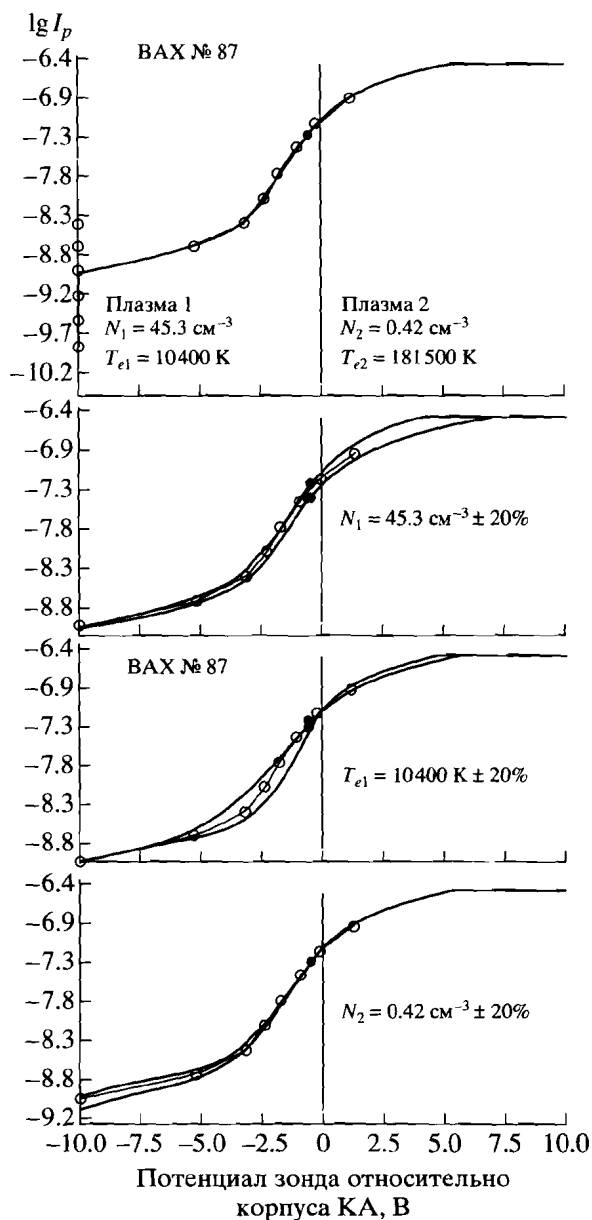


Рис. 4. Результат обработки ВАХ № 87 (верхняя панель) и оценки точности подбора параметров N_1 , T_{e1} и N_2 (три нижние панели).

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 показаны результаты измерений T_e с вычислением величины T_e на борту. Период, для которого имеются 1800 параллельно зарегистрированных через СТО записей вольт-амперных характеристик (ВАХ), отмечен вертикальными линиями с обеих сторон рисунка. Внизу рисунка приведены орбитальные и географические параметры: высота H , инвариантная широта $InvL$, L – параметр, MLT , параметр AVS – угол между вектором скорости КА и направлением на Солнце, $Bmag$ – величина магнитного поля в нТ, $Cadr$ – номер записи в файле. Моменты измерения ВАХ,

результаты обработки которых приведены на последующих рисунках, отмечены вертикальными штрихами с указанием номера ВАХ в сеансе.

Ниже на рис. 3–7 приведены пять примеров обработки в.а.-характеристик. Все рисунки имеют одинаковый формат (кроме рис. 3б и рис. 4) и представляют собой зависимость зондового тока от потенциала зонда относительно корпуса КА. Величина тока приведена в логарифмической шкале в амперах. Верхняя сплошная кривая представляет собой вычисленные по модели значения зондового тока, светлые кружки – измеренные прибором КМ-7 значения. Темный кружок – точка, соответствующая нулевому потенциалу зонда ДЭТ-П относительно плазмы. В тех случаях, когда на рисунке имеется вторая кривая, она показывает вклад в ток зонда от электронного пучка. Результаты обработки всех пяти ВАХ приведены в таблице.

Для того, чтобы получить представление о точности проводимого подбора, на рис. 3б приведены результаты обработки ВАХ, представленной на рис. 3а, но при вариациях различных подбираемых параметров на $\pm 20\%$. Для ВАХ № 87 такие оценки приведены на одном рис. 4.

КОНФИГУРАЦИЯ ПЛАЗМЫ 1ТР + 1ЕВ (ОДНА ТЕПЛОВАЯ ИЗОТРОПНАЯ ПОПУЛЯЦИЯ + ОДИН ЭЛЕКТРОННЫЙ ПУЧОК)

Результаты подбора параметров для вольт-амперной характеристики № 430 зонда ДЭТ-П прибора КМ-7 на ИНТЕРБОЛ-2 показан на рис. 3а. ВАХ получена 28.X.96 в 21.09.36, $H = 14903$ км, $L = 9.15$, $InvLat = 70.69^\circ$, $MLT = 1.71$. Такой вид характеристики неопровержимо свидетельствует о присутствии электронного пучка. Действительно, два прямолинейных участка ВАХ, построенной в полулогарифмическом масштабе, говорят о присутствии двух групп электронов с максвелловским распределением, причем первый слева участок имеет более низкую температуру. Если бы этот участок представлял собой обычную изотропную популяцию, то расположение прямолинейных участков было бы обратным – прилегающий к потенциалу корпуса участок (правый) был бы более крутым, за которым следовал бы менее крутой (более горячий) участок, обычно называемый как “хвост” зондовой характеристики. Следовательно, в данном случае имеется группа электронов, более холодная по сравнению с преобладающей группой максвелловских электронов, причем энергетическое распределение этой группы сдвинуто на несколько эВ по оси энергий, т.е. электронный пучок.

Таким образом, тепловая плазма, соответствующая измеренной ВАХ (кружки) состоит из одной тепловой популяции с $T_e = 26800$ К (2.3 эВ) и одного электронного пучка с температурой

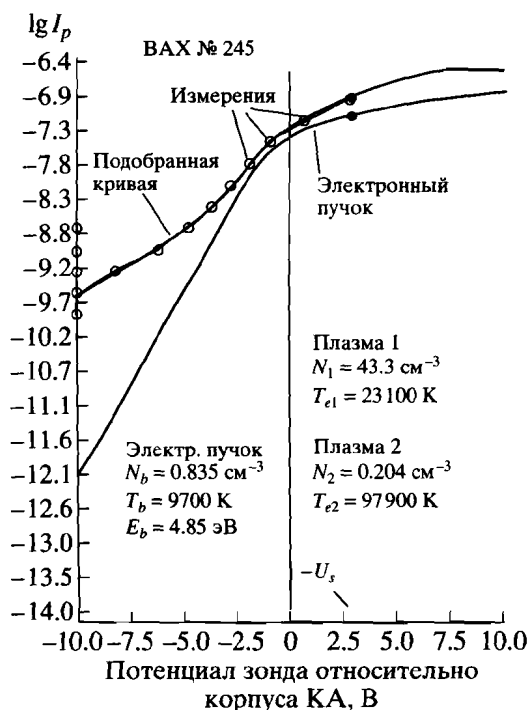


Рис. 5. Результат обработки ВАХ № 245. Концентрация второй тепловой популяции плазмы составляет 0.5% от концентрации первой популяции. Электронный пучок существенно "холоднее" обеих максвелловских популяций.

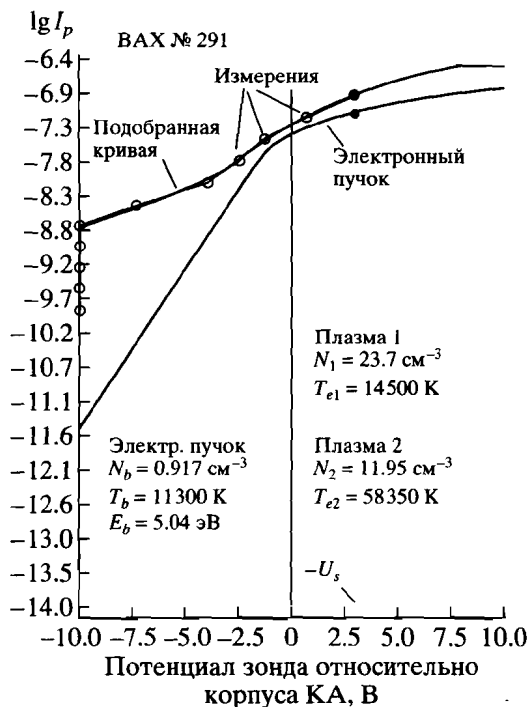


Рис. 6. Результат обработки ВАХ № 291. Концентрация второй тепловой популяции плазмы составляет 50% от концентрации первой популяции.

$T_{be} = 17\ 100\text{ K}$ (1.47 эВ) ниже, чем у тепловой популяции, но с энергией направленного движения $E_b = 7.94\text{ эВ}$. Потенциал корпуса КА в данном случае $U_s = -5.9\text{ В}$. Нижняя кривая в данном случае представляет собой вклад этого электронного пучка в в.-а. характеристику зонда. Излом этой кривой соответствует энергии направленного движения электронов пучка.

Точность подбора параметров электронного пучка иллюстрируется рис. 3б. На каждой из трех панелей показаны та же самая ВАХ, что и на рис. 3а (светлые кружки, соединенные тонкой линией) и по две подобранные зондовых кривых при изменении указанного на каждой панели параметра на $\pm 20\%$ от выбранной величины.

КОНФИГУРАЦИЯ ПЛАЗМЫ 2ТР – ДВЕ ТЕПЛОВЫХ ИЗОТРОПНЫХ ПОПУЛЯЦИИ

Такая плазма, состоящая из двух тепловых изотропных компонент с максвелловским распределением, наблюдалась во время регистрации ВАХ № 87 28.X.96 в 20.40.19, $H = 11049\text{ км}$, $L = 5.38$, $\text{Inv-Lat} = 64.45^\circ$, $\text{MLT} = 23.93$. Результаты обработки показаны в таблице и на верхней панели рис. 4. Величина концентрации более горячей компоненты составляет около 1% от концентрации основной, сравнительно холодной компоненты. Это не означает, что точность определения параметров составляет 1%, поскольку вклад в зондовую

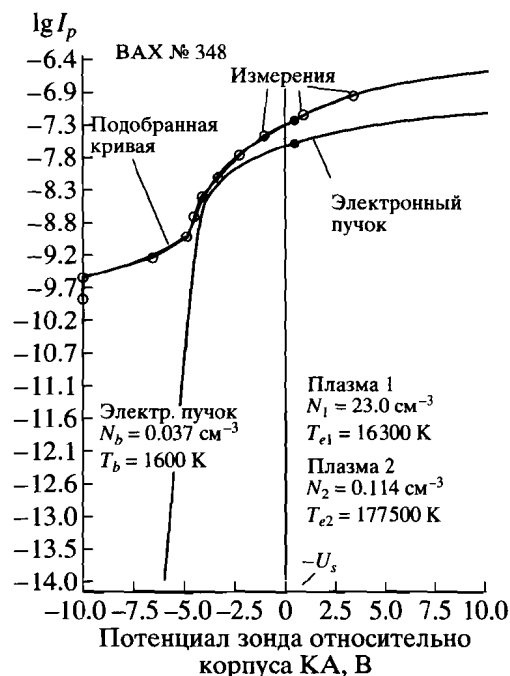


Рис. 7. Результат обработки ВАХ № 348. Пример аномально "холодного" электронного пучка.

ны на по-
кальными
сансе.
меров об-
ки имеют
рис. 4) и
вого тока
рпуса КА.
омической
ивая пред-
значения
меренные
жок – точ-
налу зонда
учаях, ког-
на показы-
пучка. Ре-
иведены в
авление о
3б приве-
представлен-
чных под-
ВАХ № 87
4.

Р + 1ЕВ
НАЯ
ОННЫЙ

я вольт-ам-
ЦЭТ-П при-
на рис. 3а.
= 14903 км,
кой вид ха-
льствует о
ствительно,
строенной в
орят о при-
аксвеллов-
слева учас-
у. Если бы
ичную изо-
е прямоли-
– прилежа-
равый) был
ал бы менее
чно называ-
стики. Сле-
группа эле-
ню с преоб-
электронов,
е этой груп-
энергий, т.е.

, соответст-
) состоит из
00 К (2.3 эВ)
емпературой

характеристику вносит не величина концентрации, а величина потока этой компоненты (nv). Температура T_{e2} превышает T_{e1} в данном случае в 17 раз.

На трех нижних панелях показаны, аналогично рис. 3б, оценки точности подбора параметров N_1 , T_{e1} и N_2 . Оценка для T_{e2} не приведена, так как качественно и по величине она очень близка к оценке N_2 .

КОНФИГУРАЦИЯ ПЛАЗМЫ 2ТР + 1ЕВ (ДВЕ ТЕПЛОВЫХ ИЗОТРОПНЫХ ПОПУЛЯЦИИ + ОДИН ЭЛЕКТРОННЫЙ ПУЧОК)

Плазма, состоящая из двух тепловых изотропных компонент с максвелловским распределением, наблюдалась во время регистрации ВАХ № 245, 291 и 348 (рис. 5, 6 и 7), полученных 28.X.96 в 20.53.48, 20.57.44 и 21.02.35 UT соответственно, $L = 7.23, 7.76$ и 8.36 , $\text{InvLat} = 68.09^\circ, 68.90^\circ$ и 69.73° , $\text{MLT} = 0.77, 1.01$ и 1.30 и $H = 12981$,

13497 и 14095 км соответственно. Следует отметить практически одинаковую энергию направленного движения электронных пучков – около 5 эВ, что, по-видимому, позволяет отнести их к одной и той же магнитосферной структуре, поскольку все три ВАХ получены в пределах 2 градусов инвариантной широты. При этом пучок 348 является своего рода аномалией – его температура составляет 1600 К. Аналогично, тепловая популяция 2 в случае ВАХ 291 также отличается от большинства других случаев – величина концентрации N_2 составляет около 50% от величины концентрации N_1 . Чаще всего это соотношение лежит в пределах 0.5–2%, как в случае ВАХ 245 и 348.

Обсуждение геофизических аспектов полученных результатов требует рассмотрения большего количества ВАХ и не входит в рамки данной работы, поэтому ограничимся приведением результатов обработки пяти приведенных выше ВАХ.

Таблица.

Рис.	№ ВАХ	Конфигурация	Потенциал корпуса	Тепловая популяция 1		Тепловая популяция 2		Электронный пучок		
			$U_k, \text{В}$	$N_1, \text{см}^{-3}$	$T_1, \text{К}$	$N_2, \text{см}^{-3}$	$T_2, \text{К}$	$E_{b1}, \text{эВ}$	$N_{b1}, \text{см}^{-3}$	$T_{b1}, \text{К}$
3а	430	1ТР + 1ЕВ	-5.9	48.0	26800	<1.0 <0.2	30000 60000	7.94	0.542	17100
4	87	2ТР	+0.5	45.3	10400	0.420	181500	5.0 5.0	<0.003 <0.001	30000 3000
5	245	2ТР + 1ЕВ	-2.8	43.4	23100	0.204	97900	4.85	0.835	9700
6	291	2ТР + 1ЕВ	-3.0	23.7	14500	11.95	58350	5.04	0.917	11300
7	348	2ТР + 1ЕВ	-0.4	23.0	16300	0.114	177500	4.93	0.037	1600

Для дополнительной оценки точности подбора для ВАХ № 430, которая соответствует конфигурации тепловой плазмы с одной тепловой популяцией, в двух строках ниже строки 1 таблицы приведены предельные значения концентрации второй популяции, при которых эта популяция становится заметной при визуальном подборе. Если предположить, что температура электронов этой популяции $T_{e2} = 30\ 000$ К (столбец T_2), то величина ее концентрации $N_2 < 1.0$ (столбец N_2). Аналогично, при $T_{e2} = 60\ 000$ К величина $N_2 < 0.2$. При величине $N_1 = 48.0$ это соответствует 2% и 0.4% соответственно.

Таким же образом оценена точность подбора для ВАХ № 87, соответствующей плазме без пучка электронов. Если предположить, что направленная скорость пучка соответствует энергии $E_{b1} = 5.0$ эВ (столбец E_{b1}), то при тепловой

энергии пучка $E_{th} \approx 3$ эВ (30 000 К) концентрация электронов в пучке $N_{b1} < 0.003 \text{ см}^{-3}$ (столбец N_{b1}), иначе он был бы замечен при визуальном подборе. Аналогично, при $E_{th} \approx 0.3$ эВ (3000 К) величина $N_{b1} < 0.001 \text{ см}^{-3}$.

Таким образом, из результатов обработки ВАХ следует, что, помимо тепловой изотропной популяции плазмы с максвелловским распределением в высокоширотной магнитосфере на высотах 10–20 тыс. км, практически всегда присутствуют другие компоненты – более “горячая” тепловая плазма с максвелловским распределением, пучки электронов с различным соотношением между тепловой и направленной скоростями или дополнительные к тепловым популяциям плазмы потоки ионов.

Если для электронных пучков в рамках данной методики удалось определить с приемлемой точ-

Следует отметить направление направленных пучков – около 2 градусов от нормали к поверхности, поскольку температура соловая популяция от большинства концентрации N_2 концентрации N_2 может в пределах 8.

спектров получения большего количества данной работы с помощью результатов выше ВАХ.

онный пучок

n_{b1}, cm^{-3}	T_{b1}, K
0.542	17100
0.003	30000
0.001	3000
0.835	9700
0.917	11300
0.037	1600

концентрация n_{b1} (столбец N_{b1}), визуальном подборе (3000 K) величины

атов обработки тепловой изотропной ким распределении в магнитосфере на высотах всегда присутствует “горячая” теплораспределением, соотношением скоростями или популяциям плазмы

в рамках данной приемлемой точ-

ностью такие основные параметры, как N , E и T_e , то для этих дополнительных потоков ионов максимум, что можно утверждать на данном этапе достоверно, это только факт их наличия. В силу характерных особенностей формирования суммарной токовой характеристики зонда определить достоверно параметры дополнительного ионного потока без привлечения вспомогательных сведений не представляется возможным. В некоторых случаях такое определение возможно с использованием параметра U_2 прибора КМ-7, однако этот вопрос выходит за рамки данной работы.

ВЫВОДЫ

На основе анализа выбранных в.-а. характеристик по данным двух пролетов получены следующие результаты.

1. Тепловая изотропная популяция плазмы с максвелловским распределением в высокоширотной магнитосфере на высотах ~10000–20000 км без примеси других компонент тепловой или сверхтепловой плазмы практически не встречается. Реально наблюдаемая тепловая плазма в этих областях пространства почти всегда состоит из различных комбинаций максвелловских и нематвелловских компонентов.

2. Выявлены следующие компоненты тепловых и сверхтепловых электронов и ионов плазмы с энергиями $E \leq 15$ эВ:

– Изотропная популяция электронов и ионов с максвелловским распределением.

– Пучки электронов с различным соотношением между тепловой и направленной энергией. Чаще всего встречаются пучки с энергией направленного движения E_b , значительно превышающей их тепловую энергию E_{th} (“холодные” электронные пучки). Встречаются пучки с примерно одинаковым соотношением тепловой и направленной энергий (“горячие” электронные

пучки). Абсолютные величины и соотношение между направленной и тепловой энергиями электронных пучков дает указание на место и, возможно, механизм их формирования.

– Дополнительные потоки ионов. Достоверно можно утверждать на данном этапе лишь факт их наличия, которое сравнительно легко определяется даже при визуальном просмотре формы вольт-амперных характеристик в области отрицательных потенциалов. Требуется дополнительный анализ для выяснения возможности определения их конкретных параметров, а также являются ли они изотропными или направленными. Возможно, что речь идет о заметном вкладе ($n_i v_i$) от сверхтепловых ионов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афонин В.В., Акентиева О.С., Шмилауэр Я., Шумунек И. Первые результаты измерения тепловой плазмы в проекте Авроральный Зонд. Эксперимент КМ-7 // Космич. исслед. 1998. V. 36. № 1. С. 16–32.
2. Laframboise J.G., Sonner L.J. Current Collection by Probes and Electrodes in Space Magnetoplasmas: A Review // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. P. 337–357.
3. Parker L.W., Whipple E.C., Jr. Theory of Spacecraft Sheath Structure, Potential, and Velocity Effects on Ion Measurements by Traps and Mass Spectrometers // J. Geophys. Res. 1970. V. 75. P. 4720–4733.
4. Medicus G. Spherical Langmuir Probe in “Drifting” and “Accelerated” Maxwellian Distribution // J. Appl. Phys. 1962. V. 33. № 10. P. 3094–3100.
5. Whipple E.C. The Equilibrium Potential of a Body in the Upper Atmosphere and in Interplanetary Space // NASA Report X-615-65-296. Goddard Space Flight Center. Greenbelt, Md, 1965.
6. Spacecraft/Plasma Interactions and their Influence on Field and Particle Measurements. Proceedings of the 17th ESLAB Symposium. Noordwijk. The Netherlands, 13–16 September 1983. ESA SP-198. ESA, 1983.
7. Козлов О.В. Электрический зонд в плазме. М.: Атомиздат, 1969.

INTERBALL-2 Measurements of the Components of Thermal and Suprathermal Plasma ($E \leq 15$ eV) in High-Latitude Regions of the Magnetosphere at Altitudes of 2–3 R_E

V. V. Afonin¹, O. S. Akentieva¹, and J. Smilauer²

¹ Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Profsoyuznaya ul. 84/32, Moscow, 117810 Russia

² Institute of Atmosphere Physics, Prague, Czech Republic

The KM-7 experiment was carried out on the INTERBALL-2 satellite with the object of measuring the electron temperature T_e of thermal plasma in peripheral regions of the plasmasphere and in the auroral zone of the magnetosphere at altitudes of 2–3 Earth's radii. The results of T_e measurements showed that the Maxwellian electron energy distribution, though assumed to dominate in the indicated regions when designing the apparatus, turned out to be invalid in most cases. Because of this, the current-voltage characteristics of a spherical probe were recorded and processed with the aim of checking the Maxwellian electron distribution. To this end, a numerical model was developed for the probe characteristics, as applied to the experimental conditions. The model was used to obtain, for the first time, reliable detailed data on the structure of thermal plasma in the high-latitude magnetosphere at altitudes of up to 20000 km. The model is briefly described, and the first results are presented.