

УДК 533.9

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ПЛАЗМЫ В ПРОЕКТЕ АВРОРАЛЬНЫЙ ЗОНД. ЭКСПЕРИМЕНТ КМ-7

© 1998 г. В. В. Афонин*, О. С. Акеньтиева*, Я. Шмилауер**, И. Шимунок**

* Институт космических исследований РАН, г. Москва

** Институт физики атмосферы, Прага, Республика Чехия

Поступила в редакцию 30.09.97 г.

Эксперимент КМ-7 предназначен для проведения измерений электронной температуры T_e тепловой плазмы в периферийных областях плазмосферы и в авроральной зоне магнитосферы на высотах до 4–5 радиусов Земли; в качестве вспомогательного параметра при наличии высокоопросной телеметрии определяются также потоки тепловых ионов, из которых можно оценить величину их концентрации.

НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ

Основной целью эксперимента КМ-7 является получение сведений о распределении T_e в периферийных областях плазмосферы и в прилегающих областях магнитосферы. Во-первых, эти сведения важны сами по себе – для знания распределения T_e в пространстве и поведения в цикле солнечной активности, для исследования теплового баланса, для выявления источников и стоков в процессах нагрева магнитосферной плазмы и т.д. Во-вторых, в качестве косвенного фактора, T_e является одним из важнейших параметров при решении различных проблем физики магнитосферной плазмы. Вследствие сильно эксцентричной орбиты *Авроральный зонд* проходит через большинство важнейших областей магнитосферы; при этом должны регистрироваться различные типы популяций плазмы (в диапазоне энергий от ≤ 1 эВ до МэВ-диапазона) и типов плазменных волн (которые являются эффективным связывающим агентом между различными типами частиц). Свойство неустойчивости плазмы играет большую роль в различных плазменных процессах, которые происходят в авроральной зоне, таких как аномальное сопротивление, двойные слои, ионно-циклотронная неустойчивость и др. Пороговые величины и инкременты нарастания различных типов неустойчивости плазмы зависят от T_e . В некоторых случаях знание T_e весьма критично при изучении возможных типов неустойчивости. Например, параллельные электростатические колебания возможны только в том случае, если скорость теплового дрейфа электронов относительно ионов меньше тепловой скорости электронов и наоборот для ионного звука. Многие детали распада кольцевого тока и передачи энергии кольцевого тока в ионосферу все еще не

ясны. Известно, что область перекрытия энергичных частиц кольцевого тока и холодных частиц плазмосферы неустойчива относительно ионно-циклотронных волн, которые резонируют с энергичными частицами. Присутствие холодной плазмы эффективно уменьшает резонансную энергию в этих процессах, поэтому их понимание требует знания отношения плотностей холодной и горячей плазмы $N_{\text{cold}}/N_{\text{hot}}$.

Несмотря на важность знания характеристик тепловой плазмы в магнитосфере Земли, экспериментальных данных по этой области явно недостаточно. Поэтому измерения температуры электронов T_e и концентрации ионов N_i холодной магнитосферной плазмы представляют особый интерес для должной идентификации и исследования различных плазменных процессов в магнитосфере Земли.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения температуры электронов в земной ионосфере достигли уровня “стандартных” методов; в течение последних 2–3 десятилетий успешно проведено много таких экспериментов. С другой стороны, измерения T_e на больших высотах (> 3000 – 4000 км) практически отсутствуют. Первые экспериментальные измерения T_e в плазмосфере были выполнены на спутнике *IMP-2* методом тормозящих потенциалов при помощи 3-электродной плоской ионной ловушки [1]. Авторы пришли к заключению о том, что на расстоянии $R = 4R_E$ величина $T_e \sim 1$ эВ и T_e возрастает с высотой пропорционально R^2 (R – геоцентрическое расстояние). От примерно $5R_E$ до апогея $15.9R_E$ T_e остается почти постоянной и лежит в

пределах от 1 до 2 эВ. Эти результаты были подвергнуты критике в литературе.

T_e измерялась также на спутнике OGO-5 при помощи сферического зонда Ленгмюра [2]. Практически не опубликовано никаких данных. Было обнаружено, что вблизи магнитопаузы $T_e = 3.5 \times 10^4$ К, однако интерпретация данных измерений была затруднена наличием фотоэмиссии.

Основной трудностью измерения T_e в плазмосфере является низкая плотность окружающей плазмы и возмущающее воздействие потенциала корпуса космического аппарата. При измерениях в плазмосфере, особенно на ее периферии, где концентрация холодной плазмы падает, хорошо зарекомендовавшие себя при измерениях в ионосфере классические методы измерения T_e либо нельзя использовать вообще, либо использование их возможно с существенной потерей точности. В двух наиболее часто применяемых в ионосферных исследованиях методах измеряемым параметром является либо ток – различные модификации зонда Ленгмюра [3], либо скачок в плавающем потенциале зонда, работающего в “плавающем” режиме – высокочастотный зонд электронной температуры [4]. Очень низкая плотность тепловой плазмы в плазмосфере приводит к повышению требований к чувствительности усилителей тока в первом случае и ко входному сопротивлению предусилителя во втором.

В табл. 1 приведены ожидаемые значения ионного тока I_i (столбец 2) и электронного тока I_e (столбец 3), которые должны течь на зонд прибора КМ-7 (ДЭТ-П) при различных величинах концентрации холодной плазмы (столбец 1) в предположении о том, что потенциал зонда относительно плазмы равен нулю. Эти оценки сделаны для радиуса зонда $r = 60$ мм, скорости относительно плазмы КА 2 км/с и электронной температуры $T_e = 3000^\circ\text{К}$. Для того, чтобы из зондовых данных получить температуру и концентрацию, необходимо изменить вольт-амперную характеристику; при измерениях с точностью 1% в случае $N_i = 1 \text{ см}^{-3}$ необходимо измерять ток $I_{im} = 3.2 \times 10^{-14}$ А – столбец 5. Чтобы измерять это минимальное значение хотя бы с 10%-й точностью, необходимо иметь усилитель с чувствительностью $I_s = 3.2 \times 10^{-15}$ А (столбец 6). В случае в.ч.-зонда электронной температуры входное сопротивление предусилителя должно быть 3×10^{14} Ом – столбец 4 (для $N_i = 1 \text{ см}^{-3}$, потенциала КА $\phi_s = \pm 10$ В и очень мягкого требования о том, чтобы ток утечки был не более 10% от рабочего тока $I_r = 0.1I_i$). Эти оценки показывают, что имеющийся в настоящее время уровень электроники позволяет использовать традиционные “ионосферные” методы при не очень жестких требованиях к точности измерений только при $N_i \geq 10^3 \text{ см}^{-3}$. Все это делает весьма проблема-

Таблица 1

$N, \text{ см}^{-3}$	$I_i, \text{ А}$	$I_e, \text{ А}$	R_{imp}, Ω	$I_{im}, \text{ А}$	$I_s, \text{ А}$
1	2	3	4	5	6
1	3.6×10^{-12}	4×10^{-9}	3×10^{14}	3.2×10^{-14}	3.2×10^{-15}
10	3.6×10^{-11}	4×10^{-8}	3×10^{13}	3.2×10^{-13}	3.2×10^{-14}
100	3.6×10^{-10}	4×10^{-7}	3×10^{12}	3.2×10^{-12}	3.2×10^{-13}

тичным получение данных о поведении T_e тепловой плазмы в плазмосфере и за ее пределами при использовании традиционных “ионосферных” методов.

Поэтому для прибора КМ-7 был разработан и реализован новый метод измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) тепловой плазмы – метод компенсации токов на зонд. Суть метода основана на двух принципах: зонд всегда остается в плавающем режиме и различные участки ВАХ проходятся путем принудительной инжекции на зонд искусственных “ионных” или “электронных” токов. В отличие от классического зонда Ленгмюра, в котором измеряется ток на зонд в зависимости от потенциала зонда $I_p(U_p)$, в данном методе измеряется вольт-амперная характеристика плавающего зонда (ВАХ-ПЗ) – зависимость плавающего потенциала зонда от тока на зонд $U_{fp}(I_p)$. Этот метод фактически объединяет в себе достоинства обоих вышеуказанных методов – он использует плавающий режим и в то же время позволяет зарегистрировать вольт-амперную характеристику. Знание ВАХ позволяет контролировать достоверность измерения T_e , так как позволяет контролировать наличие (или отсутствие) максвелловского распределения электронов по энергиям. Он обладает следующими достоинствами:

а) датчик всегда находится под плавающим потенциалом, так как полный ток на зонд всегда равен нулю.

б) потенциал зонда практически всегда отрицателен относительно плазмы (даже при положительном зарядном КА), и поэтому зонд не нарушает потенциал корпуса КА.

в) потенциал зонда практически всегда квазипостоянный – он изменяется ступенями, оставаясь постоянным в течение длительности ступени; никаких переменных сигналов на зонд не подается, что весьма важно для сопутствующих волновых экспериментов.

г) существенно облегчена техническая реализация методики измерения, так как значительно легче реализовать широкодиапазонный источник тока, чем обеспечить широкодиапазонное измерение тока.

Измерения проводятся циклами по 5.12 с в определенной последовательности; процесс измерения проиллюстрирован на рис. 1. При работе

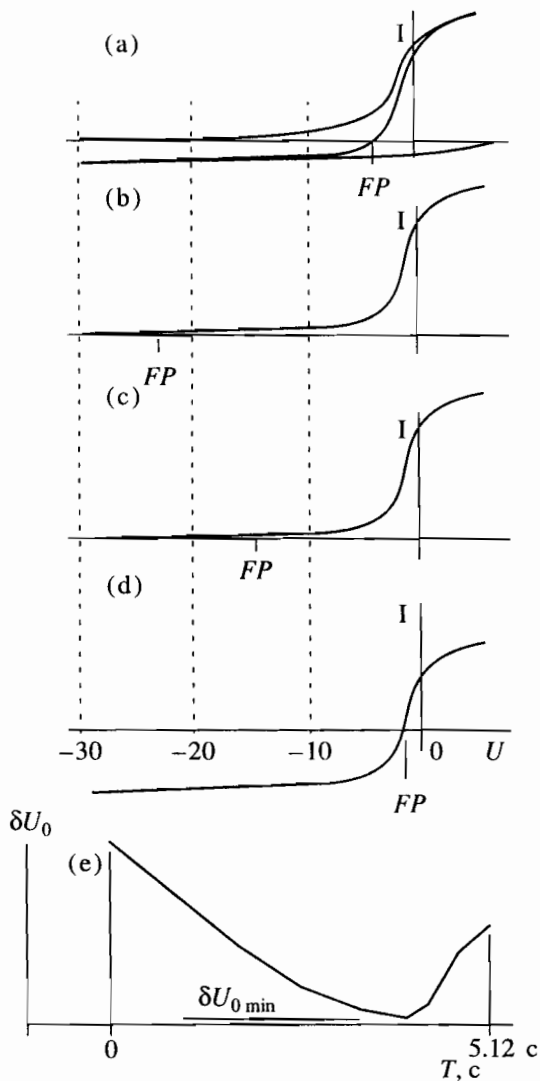


Рис. 1. Цикл измерений.

зонда в каждом цикле измерения происходят два процесса компенсации токов:

1) *Компенсация ионного тока* на датчик при нулевом электронном токе. В начале цикла U_2 регулируется таким образом, чтобы плавающий потенциал зонда FP лежал в пределах $-20 \text{ В} \leq FP \leq -15 \text{ В}$. Если равновесный потенциал датчика FP выше -15 В , то компенсационный ток I_{ic} увеличивается на 0.156 нА , если он ниже -20 В , то происходит обратный процесс — I_{ic} уменьшается на один шаг. В результате этого процесса ток тепловых электронов на зонд $I_e = 0$, а ионный ток I_i скомпенсирован (см. рис. 1b). Следовательно, величина U_2 пропорциональна потоку ионов на зонд и может быть использована для определения концентрации ионов N_i в окружающей плазме.

2) *Измерение ВАХ-ПЗ*. На зонд подается ступенчатая последовательность искусственного “электронного” тока — измерительный ток I_{ec} .

Измерительный ток I_{ec} изменяется в два раза на каждом шаге измерения вольт-амперной характеристики. При этом потенциал датчика, находящегося в плазме, изменяется таким образом, что электронный ток на датчик из плазмы компенсирует заданный ток I_{ec} . На каждом шаге регистрируется величина потенциала зонда относительно корпуса КА $UPK(n)$, где n — количество ступеней, зависит от режима работы. В результате этого процесса получается вольт-амперная характеристика в полулогарифмическом виде $UPK(n) = U_{fp}(I_p)$. Скачок в начальную точку желательнее осуществлять при возможно больших токах; поэтому измерение начинается с максимального I_{ec} . Измерение заканчивается при нулевом I_{ec} , и в это время происходит измерение потенциала датчика и, если необходимо, изменение I_{ic} на один шаг. Из кривой $UPK(n)$ на борту вычисляется кривая приращений потенциала зонда $dU(n)$, которая анализируется также на борту и находится ее минимум; этот минимум соответствует наиболее крутому участку вольт-амперной характеристики зонда Ленгмюра (рис. 1e). При этом в этой точке регистрируется потенциал зонда относительно потенциала корпуса КА — параметр PK .

Полученная характеристика $UPK(n)$ в случае регистрации участка, соответствующего тепловым электронам, имеет “точку перелома”; в некоторых случаях в этой области наблюдается даже линейный участок. Часть характеристики с минимальной скоростью изменения представляет тепловую популяцию плазмы. По значению минимума разностей полученных точек на борту рассчитывается значение электронной температуры T_e по формуле:

$$T_e = 16747 dU [\text{К}, \text{В}].$$

Точка минимального изменения потенциала (т.е. точка с максимальной крутизной вольт-амперной характеристики) характеризует и потенциал плазмы относительно потенциала объекта. Эта точка находится между плавающим потенциалом и потенциалом плазмы, причем существенно ближе к плавающему потенциалу — параметр PK , квазиплавающий потенциал зонда. Для оценки, насколько этот потенциал отличается от потенциала плазмы, необходимо учесть ряд обстоятельств. На больших высотах из-за кулоновских взаимодействий плазма обычно близка к изотермической; при температурах до 3 эВ тепловые скорости ионов могут значительно превышать скорость объекта. Ионный состав в высокоширотных областях может изменяться от чисто водородного к кислородному. Для этих условий оценка плавающего потенциала плазмы составляет $3.4\text{--}4.5 \text{ В}$. На освещенных участках орбиты вокруг КА могут находиться вторичные фотоэлектроны; их плотность зависит от свойств

поверхности элементов конструкции КА. Для точного определения потенциала плазмы необходимо анализировать баланс токов на КА в целом; имеются не все данные для такого анализа. В этом случае целесообразно пользоваться характерным “квазиплавающим” потенциалом РК. Этот потенциал в приборе КМ-7 всегда определяется относительно потенциала объекта.

На верхней панели (рис. 1а) показана начальная зондовая характеристика для случая отрицательного потенциала корпуса КА; показаны также ионный I_i и электронный токи I_e на зонд. Следующая панель б) показывает зондовую характеристику после начальной компенсации ионного тока; $FP > -20$ В. Панели с) и д) показывают два шага со значениями I_{ec} , соответствующими $FP = -15$ В и $FP \approx \kappa T_e$ для тепловых электронов.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

При подготовке эксперимента стояли следующие основные проблемы:

а) Неточное знание условий измерения – состояния холодной плазмы, влияния вторичных фотоэлектронов и потоков мягких электронов, влияния изменений потенциала объекта. В связи с этим выбрана гибкая схема измерений, позволяющая адаптировать процесс измерений к реальным условиям.

б) Обеспечение теплового режима датчика. С целью подавления фотоэмиссии датчик был установлен в тени. Поскольку по условиям измерений датчик должен обладать достаточно большой неизолированной поверхностью, а также иметь возможно большую “опорную” поверхность, обе из которых должны быть в контакте с плазмой, т.е. неизолированы, это представило серьезную проблему с точки зрения обеспечения теплового режима, поскольку преобразователи источников тока содержат ферриты, качество которых значительно ухудшается с понижением температуры.

в) Радиационная стойкость прибора. По некоторым оценкам приборы не должны были работать дольше двух-трех месяцев даже при их выключении в радиационных поясах. Учитывая ограничения по весу, блок электроники был защищен сплавом алюминия толщиной 5 мм, электроника датчика была практически без защиты. Именно поэтому для ОЗУ была выбрана схема (нижеприведенного типа) с повышенной радиационной стойкостью, для микропроцессорной системы были выбраны почти “исторические” схемы КМОП с не очень высокой плотностью интеграции.

Эксперимент состоит из блока электроники КМ-7 и сферического датчика ДЭТ-П. Датчик представляет собой полую сферу из нержавеющей стали диаметром 120 мм и содержит входной предусилитель. Датчик установлен на середине длинной штанги (рис. 2) и ориентирован в анти-солнечном направлении; датчик имеет защитный

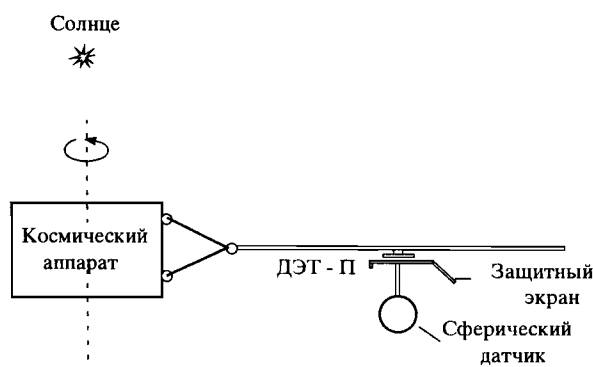


Рис. 2. Размещение датчика ДЭТ-П на КА.

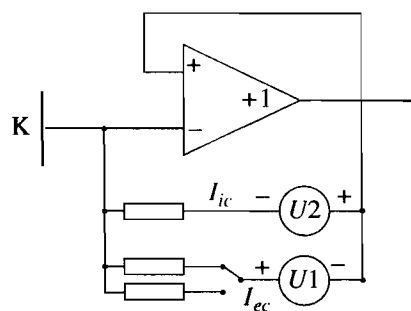


Рис. 3. Функциональная схема измерений.

экран, предназначенный для уменьшения влияния фотоэлектронов как с самого датчика, так и с прилежащих участков штанги. Этот экран не может полностью исключить попадание этих фотоэлектронов на зонд, однако он значительно уменьшает возмущающий ток фотоэлектронов I_{ph} . Поскольку гирорадиус тепловых электронов ($E \approx 1$ эВ) при величине магнитного поля $B = 100$ уравен ≈ 33 м, на зонд могут попадать только фотоэлектроны с элементов конструкции, не экранированных экраном и поэтому их поток значительно ослаблен. Кроме того, в I_{ph} дадут вклад только те фотоэлектроны, которые были эмитированы под определенным углом; для того, чтобы они попали на зонд, локальное магнитное поле должно иметь соответствующее направление. Для предотвращения или по крайней мере уменьшения возмущающего воздействия отличия потенциала корпуса КА от потенциала плазмы весь датчик в целом и солнечный экран электрически изолированы от места крепления к КА.

Блок электроники расположен на основном корпусе спутника, а предусилитель размещен внутри датчика – это позволяет использовать для их связи только низкоимпедансные сигналы; ограничение на длину соединительных кабелей в этом случае отсутствует. Электроника прибора состоит из двух частей: электроники датчика (внутри

Таблица 2

Блок	Размеры	Вес	Потребление
Датчик ДЭТ-П	ψ 120 × 240 мм	980 г	0.4 Вт
Блок электроники КМ-7	140 × 150 × 76 мм	1770 г	1.4 Вт

металлической сферы) и блока электроники, расположенного на внешней стенке объекта.

Электроника измерения ВАХ в датчике прибора КМ-7 схематически приведена на рис. 3. Помимо усилителя, включенного по схеме трансформатора импеданса, она содержит два дистанционно управляемых источника тока. Эти источники образованы при помощи изолированных источников напряжения U_1 и U_2 и сопротивлений 1 ГОм, но так как они последовательно включены между точками с одинаковым потенциалом, то эти цепочки фактически являются источниками тока.

Первый из них, U_1 , предназначен для инъекции “электронного тока” и вырабатывает ток I_{ec} , используемый для компенсации электронного тока на зонд вплоть до $I_e = 1.9 \times 10^{-5}$ А. Он работает в диапазоне 10–200 В с возможностью управления 12 битами (4096 уровней). Для расширения диапазона инжектируемых токов имеется возможность переключения сопротивления с 1 ГОм на сопротивление 10 МОм, т.е. основной диапазон токов составляет 0–190 нА, расширенный диапазон на два порядка выше. Нуль инжектируемого электронного тока сдвинут на 200 единиц (примерно 10В).

Второй источник, U_2 , предназначен для компенсации ионного тока на датчик и вырабатывает ток I_{ic} , используемый для компенсации ионного тока на зонд вплоть до $I_i = 4 \times 10^{-8}$ А. Он имеет диапазон 2–40 В, т.е. компенсирует ионные токи до 30 нА. Его управление осуществляется 256 ступенями (8 бит). Соответствующий “нулевой” ток ионного источника, необходимый для компенсации “нулевого” электронного тока, соответствует 60 единицам кода (опять 10В). Этим объясняются приведенные предельные значения значений источников напряжения. Конструктивно оба источника образованы двумя идентичными обмотками и выпрямителями с идентичными нагрузками; одна (с одним заземленным концом) служит для управления и вторая (изолированная) является рабочим источником. Качеству изоляции этих источников и снижению их емкостей относительно корпуса уделялось большое внимание.

Блок электроники обеспечивает следующие функции:

– управляет процессом измерения согласно вышеприведенной методике, учитывая при этом необходимые задержки для установления переходных процессов. Для управления источниками использованы 12- и 8-битовые ЦАПы. Для измерения потенциала зонда и всех других напряжений использован 13-битовый АЦП. Для преобразования используется программная поочередная битовая компенсация измеряемого напряжения выходом 12-битового ЦАП с возможностью использования двух опорных напряжений: или +10В, или –10В (13-й бит).

– обеспечивает форматирование данных в стандартные блоки с заданной структурой и выдачу их на телеметрию РТК и одновременно на телеметрию СТО. Учитывая низкие выделенные прибору опросности, в РТК выдаются только результаты бортовой обработки ВАХ, а в СТО выдаются полные характеристики. Выдача цифровых данных в РТК осуществляется восемью ключами, сигналы аналоговых каналов формируются двумя 8-битовыми ЦАП по результатам обработки. Связь прибора с системой СТО обеспечивается схемой UART IM6402.

– обеспечивает управление прибором от бортовых разовых команд и, помимо этого, принимает от ODCS (блок сбора данных и управления СТО) посылки, с помощью которых возможно перезаписывать ячейки ОЗУ прибора и/или читать все ячейки ЗУ. ODCS эти посылки получает при помощи командной линии СТО.

– обеспечивает ряд вспомогательных функций: измерение температуры в блоке электроники и в датчике, вырабатывает точные опорные напряжения +10В и –10В, управляет реле переключения диапазона электронного тока и управляет автоматической системой включения/выключения нагрева датчика с целью поддержания необходимого диапазона рабочей температуры. Все эти функции обеспечены на основе микропроцессорной системы, основанной на КМОП микропроцессоре NSC800 и порте NSC810 производства National Semiconductor. Такая организация обеспечивает гибкое управление рабочими режимами прибора при помощи телекоманд с Земли. В качестве ОЗУ использована схема 2К × 8 Harris 65162, программа хранится в двух ПЗУ K556RT6. Поскольку в датчике используются ферриты, в его состав включен блок дополнительного нагрева (150 МВт) и измерения температуры. Бортовая программа обеспечивает включение нагрева при понижении температуры ниже –20°C и его выключение при температуре выше –3°C.

Типичное потребление прибора менее 2 Вт. Основные технические характеристики приведены в табл. 2. Эксперимент выдает данные одновременно в обе ТМ-системы СТО и РТК. Выход

РТК использует два аналоговых канала для электронной температуры T_e и квазипотенциала корпуса КА РК и один 8-битовый цифровой канал для передачи цифровых результатов измерений. Скорость опроса всех каналов РТК зависит от режима работы КА; при потоке 64 бод она составляет 1 раз в 16 с, а при потоке 256 бод реализуется максимальное временное разрешение прибора 5.12 с.

Выход на СТО использует два цифровых канала и один мультиплексируемый аналоговый канал, по которому передается три аналоговых параметра. Помимо T_e и РК, через СТО передается также вольт-амперная характеристика зонда. Скорость опроса всех каналов СТО при пропускной способности радиолинии 20 кбит/с составляет 5 с⁻¹.

Для управления экспериментом с Земли используется 4 релейных команды; они позволяют переключать эксперимент в 7 различных режимов работы. На землю передаются вычисленные на борту значения T_e в градусах Кельвина, плавающий потенциал РК и значения компенсирующих токов, которые позволяют оценить величину ионной концентрации.

Датчик ДЭТ-П изготовлен в Институте космических исследований, Москва, Россия, а электроника изготовлена в Институте физики атмосферы, Прага, Республика Чехия.

РАБОТА ПРИБОРА В ПОЛЕТЕ

Несмотря на предостережения по радиации была выбрана очень простая схема работы прибора в полете. Первое пробное включение прибора было проведено 31.VIII.1996 г. в цикле очередных проверочных включений всех приборов; прибор успешно отработал заданное время (около 15 минут). Начиная с 9.IX.1996 г. прибор был включен и с этого времени не выключался. До сих пор не были обнаружены ошибки ни в программе, ни в ОЗУ. В начале работы в свободную часть ОЗУ была записана 64-битовая посылка, которая периодически проверяется. До сих пор мы не обнаружили ни одного сбоя.

С точки зрения теплового режима с самого начала наблюдается почти постоянная температура блока электроники около 10°C. Время нагрева датчика (от включения до выключения) около двух часов, но иногда наблюдаются периоды, в которых температура не опускается ниже -5°C. Возможным объяснением может быть не совсем точная ориентация объекта по направлению к Солнцу.

В начале работы с прибором велось обследование разных режимов работы, т.е. выбора диапазона инжектируемых электронных токов. В результате этих работ был выбран режим, обозначенный как режим 1, при котором ток инжектируется в ос-

новном диапазоне (без переключения сопротивлений) и максимальный ток составляет 150 нА; переключение осуществляется 11 ступенями. Максимальный ток при этом всегда перекрывает области тепловых электронов и доходит до начала участка насыщения электронной ветви зондовой характеристики. При больших токах (более высокие номера режимов) происходит уже заметное насыщение. Несколько хуже дело обстоит с компенсацией ионного тока. Иногда наблюдается недостаточный диапазон токов компенсации (максимально 30 нА). При его превышении происходит сброс на 0 (обычный однобайтовый счетчик). Такая ситуация имеет место достаточно редко (по наблюдениям СТО), менее 10% по времени. Ток компенсации может меняться только медленно – один шаг (из 256) через 5.12 с. Иногда проявляется модуляция измерений вращением спутника. По-видимому, в некоторой фазе оборота на датчик попадает свет, вызывающий вторичную эмиссию электронов, т.е. кажущийся ионный ток.

Анализ телеметрической информации первых месяцев полета позволяет заключить, что вышеописанный метод измерений реально осуществляется в полете, и прибор правильно обрабатывает запрограммированный цикл измерений. При этом прибор правильно определяет параметры тепловой компоненты плазмы вблизи периферии плазмосферы и за ее пределами; во внутренней части плазмосферы T_e , как правило, занижается. Это связано с тем, что диапазон компенсирующих ионных токов был выбран в расчете на низкую концентрацию; во внутренней части плазмосферы при высокой концентрации этого тока недостаточно для полной компенсации ионного потока на зонд (перигей *Аврорального зонда* меньше 1000 км, т.е. КА в это время находится в ионосфере).

Потенциал корпуса КА. Измеряемым параметром является разность потенциалов между потенциалом датчика и корпусом КА. Эта величина непосредственно определяет потенциал корпуса КА с точностью до величины плавающего потенциала зонда U_f ; для точного определения потенциала корпуса необходимо определить величину U_f . Для определения U_f необходимо знать величины всех токов, текущих на зонд (токи тепловых ионов и электронов, токи сверхтепловых и энергичных ионов и электронов, ток фотоэлектронов с датчика при освещении его солнцем, ток фотоэлектронов, эмиттированных с элементов конструкции КА и попадающих на зонд и ток вторичной эмиссии, возникающей при попадании на зонд энергичных частиц). Из этого следует, что для определения точного значения U_f требуется много различных данных (величины потоков вышеуказанных частиц, их массовый состав и энер-

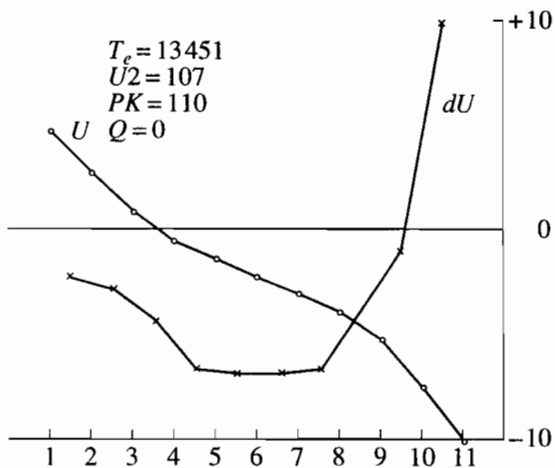


Рис. 4. Широкая область в энергетическом распределении тепловой составляющей. Вольт-амперная характеристика плавающего зонда, зарегистрированная 19.1.97 в 16.39.19 на высоте $h = 19185$ км в авроральной зоне $L = 7.8$, MLT = 22.3.

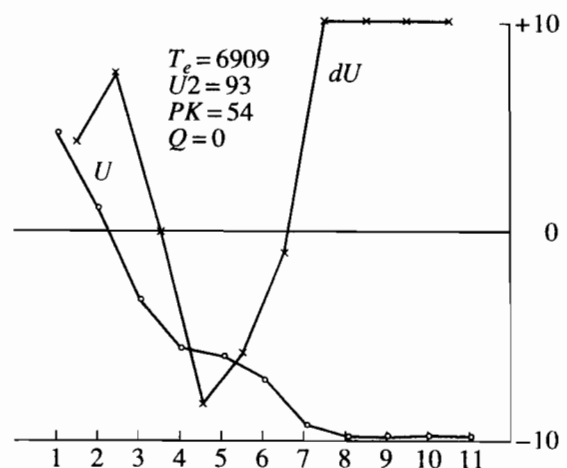


Рис. 5. Узкая область в энергетическом распределении тепловой составляющей. Вольт-амперная характеристика плавающего зонда, зарегистрированная 19.1.97 в 16.39.19 на высоте $h = 16494$ км в авроральной зоне $L = 11.38$, MLT = 19.4.

гетические распределения) и решать самосогласованную задачу о балансе токов. Весьма важным параметром для определения U_f является величина и стабильность входного сопротивления прибора. В приборе КМ-7 принят ряд конструктивных мер и схемных решений, которые обеспечивают близость плавающего потенциала U_f к "идеальному" и входное сопротивление не менее 10^{13} Ом. Применяемая методика обеспечивает измерения потенциала корпуса КА с точностью $(1-2)kT_e/e$, где e – заряд электрона. Для оперативного определения потенциала КА с разумной погрешностью ≤ 1 В целесообразно пользоваться характерным "квазиплавающим" потенциалом PK со следующим "правилом большого пальца": внутри плазмосферы величину PK надо уменьшить на 0.5–1.0 В, а вне ее в полярных широтах на 2–3 В.

Температура электронов. Поведение тепловой компоненты плазмы вдоль орбиты КА отличается большим разнообразием, поскольку КА проходил различные морфологические области околоземного пространства – от ионосферы до магнитосферы. На рис. 4–6 показаны примеры зарегистрированных ВАХ-ПЗ $UPK(n)$ – кружки и приращений dU – крестики, соответствующие разным популяциям тепловых электронов в авроральной зоне на высотах 16000–20000 км. На рис. 4 показана ВАХ-ПЗ с широким минимумом в кривой приращений dU . Эта характеристика зарегистрирована в предполуденном секторе на высоте 19185 км на $L = 7.8$ и соответствует холодной плазме с максвелловским распределением.

Случай практического отсутствия максвелловского распределения показан на рис. 5. Эта характеристика имеет острый минимум и свиде-

тельствует о нестационарном состоянии холодной плазмы; она зарегистрирована в вечернем секторе на $h = 16494$ км на $L = 11.38$.

Случай "квазистационарного" состояния холодной плазмы показан на рис. 6. В этом случае наблюдается две популяции холодных электронов с максвелловским распределением. Характеристика зарегистрирована в вечернем секторе на высоте 17820 км на $L = 11.3$.

Минимум кривой приращений dU обычно находится в районе третьей–четвертой точек, т.е. при электронном токе порядка 25 нА (в режиме 1). Такого же порядка (но несколько ниже) обычно

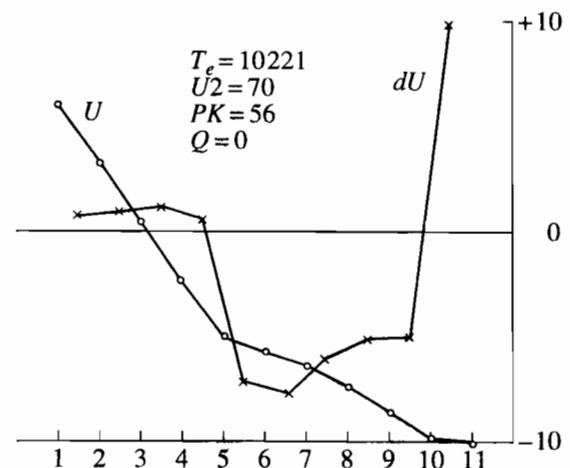


Рис. 6. Энергетическое распределение тепловой составляющей с двумя различными температурами. Вольт-амперная характеристика плавающего зонда, зарегистрированная 19.1.97 в 16.40.26 на высоте $h = 17820$ км в авроральной зоне $L = 11.3$, MLT = 20.4.

бывает и ионный ток. Из этого следует, что в точке, для которой вычисляется параметр $PK, I_i \leq I_e$, что подтверждает совпадение реальных условий работы прибора в полете с предположениями, заложенными в методику измерения при разработке прибора. Для получения точного соотношения токов необходимо определить точное значение обоих токов по телеметрическим данным.

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Как указывалось выше, прибор КМ-7 был включен 9.IX.96 и с тех пор не выключается. Это связано с необходимостью накопления данных по T_e в практически неисследованной (с этой точки зрения) области околоземного пространства. На рис. 7 показаны типичные результаты, получаемые прибором КМ-7 по каналам РТК. Это – данные одного сеанса воспроизведения бортового запоминающего устройства; данные перекрывают интервал времени от 08.27 14.IX.96 по 04.05 UT 16.IX.96, т.е. интервал около 44 часов, или около 7.5 орбит – витки 68–76. На рис. 8 показана часть рис. 7, соответствующая одному полному витку № 69. Вставки в верхней панели – круговые диаграммы Λ -MLT (инвариантная коширота – магнитное местное время) показывают расположение орбиты в северном полушарии (верхняя) и в южном (нижняя). Характерные максимумы в T_e соответствуют прохождению спутником авроральной зоны в районе апогея ($h \cong 19200$ км), провалы в T_e соответствуют прохождению спутником плазмосферы и содержат перигейный участок ($h \cong 1000$ км). В это время орбита КА проходила примерно по меридиану полдень–полночь. При этом полярный участок занимает примерно 2/3 всего времени; это связано с тем, что апогей орбиты лежит в северной авроральной зоне.

В высокоширотных областях на $h > 10000$ км величина T_e составляет 1–3 эВ. Несмотря на то, что, как указывалось выше, прибор занижает величину T_e во внутренних плотных областях плазмосферы, он показывает качественно правильную картину распределения T_e вплоть до ионосферных высот. Как видно из рис. 8, перигейный участок орбиты $h = 948$ км спутник проходил в предполночном секторе примерно вдоль $\Lambda \cong -60^\circ$. В соответствии с ожидаемым поведением ионосферы в этой области на рис. 8 виден очень интенсивный пик T_e – субавроральный максимум (СМ) T_e .

В связи с тем, что КА вращается вокруг оси X , которая должна быть ориентирована на Солнце, на величину PK могут влиять: а) ориентация набегающего потока ионов (изменяющаяся) вдоль орбиты и б) возможная засветка датчика при отклонениях ориентации от номинальной. В качестве примера на рис. 9 показан перигейный участок орбиты 70. В поведении квазипотенциала PK видны периодические синусоидальные вариации, пе-

риод которых совпадает с периодом собственного вращения КА. При нормальной ориентации ход PK соответствовал бы нижней огибающей; вершины кривой соответствуют максимальному отклонению от нормальной ориентации.

Несмотря на кажущуюся “хаотичность” вариаций T_e и PK , детальное рассмотрение этих вариаций показывает, что они являются реальным отражением поведения плазмы в авроральной зоне магнитосферы. На рис. 10 методом наложения эпох сравниваются 2 участка из рис. 7, отстоящие друг от друга примерно на сутки (на четыре орбиты). На обеих панелях показаны значения T_e . Оцифровка времени и орбиты соответствует нижней панели, где показан участок орбит 69–70 с 15.34 до 21.21 UT 14.XI.96 г. На верхней панели показан участок орбит 73–74 с 14.37 до 20.24 UT 15.XI.96 г. На обоих участках слева направо КА проходит из дневной плазмосферы на $h \cong 5000$ км в южном полушарии через перигей $h \cong 970$ км на $\Lambda \cong -60^\circ$ и выходит из нее в северном полушарии на $h \cong 10000$ км примерно в 17.01. Большую часть времени КА проводит в северной авроральной зоне на $h > 10000$ км вплоть до примерно 20.52 UT, когда он опять входит в плазмосферу в северном дневном секторе.

Два больших максимума слева являются СМ T_e в ионосфере южного полушария на высоте около 1000 км. В обоих случаях КА перешел из низких широт плазмосферы в авроральную зону в ночном секторе северного полушария на высоте $h \cong 10000$ км. Хорошо выраженные сравнительно гладкие широкие максимумы T_e следует сопоставить, по-видимому, с наблюдающимся в этой области на ионосферных высотах СМ T_e ; в данном случае, на высоте 10000–13000 км эти максимумы занимают больший широтный диапазон, а величина T_e в них достигает 10000–12000°К. В обоих случаях к области СМ T_e вплотную примыкает широкая область очень интенсивных флуктуаций, за которой следует весьма спокойная область. Эта особенность, как можно легко видеть из рис. 7, наблюдается на всех семи показанных орбитах. Как правило, в спокойных условиях в ионосфере СМ T_e отделен от области интенсивных флуктуаций (наблюдающихся в ионосфере аврорального овала) сравнительно спокойной зоной; здесь такая зона отсутствует. Анализ нескольких сеансов – порядка 20 орбит, расположенных в тех же секторах (00–12MLT), показывает, что эти две характерные зоны – “флуктуирующая” и “спокойная” являются постоянной особенностью земной магнитосферы, а именно, обе они расположены в интервале от $\Lambda \cong 60^\circ$ до $\Lambda \cong 80^\circ$ (максимальная широта орбит в данном случае), однако флуктуации наблюдаются только в интервале 00–09MLT. В интервале 09–12MLT всегда наблюдалось “спокойное” поведение T_e . В апреле 1997 г., когда орбитальная плоскость повернулась при-

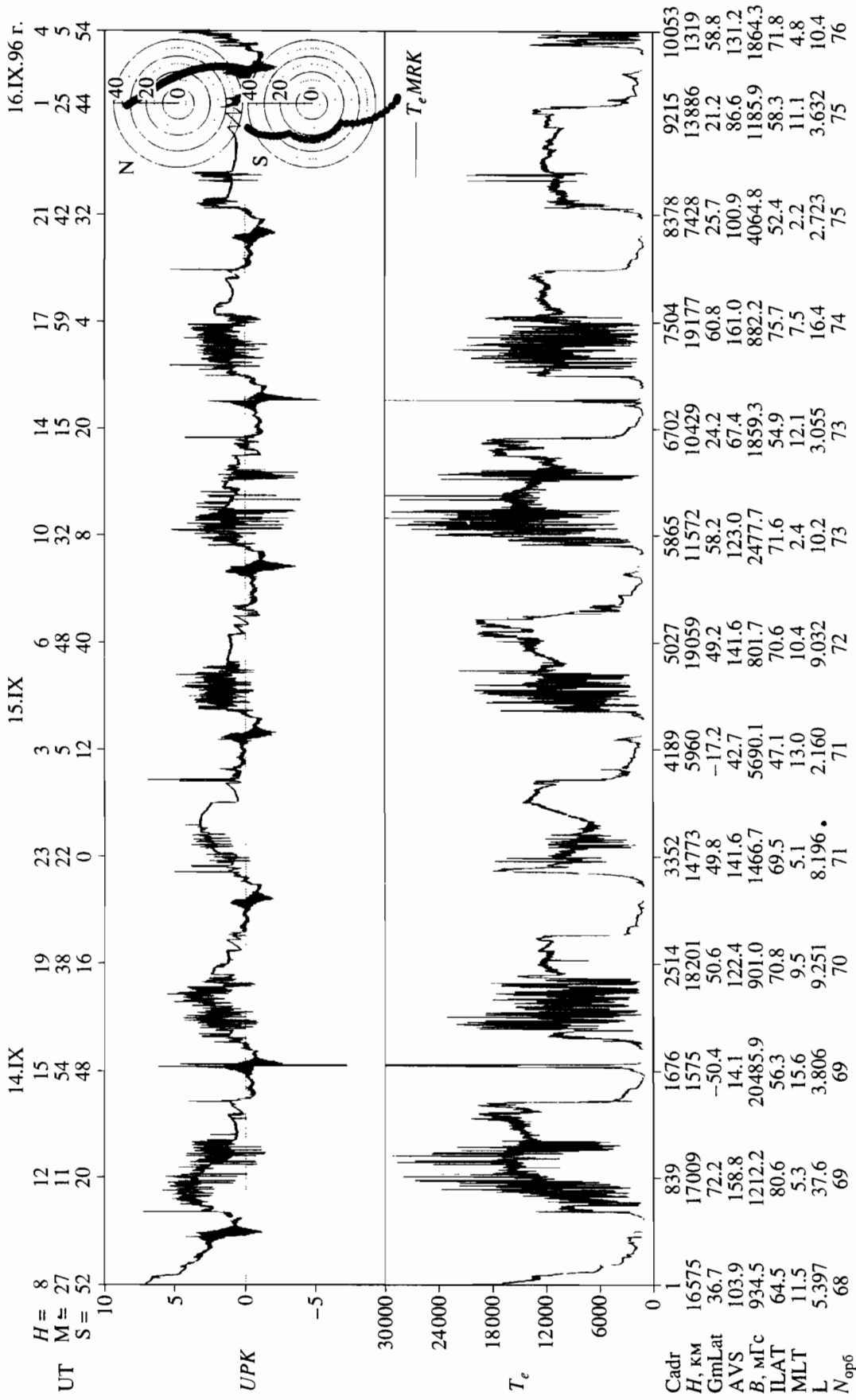


Рис. 7. Пример результатов, получаемых по аналоговым каналам МРК. Параметры UPK (квазипотенциал корпуса КА) и температура электронов вычисляются на борту. Для оперативного определения потенциала КА с разумной погрешностью ≤ 1 В величину UPK надо уменьшить внутри атмосферы на 0.5–1.0 В, а вне ее в полярных широтах на 2–3 В.

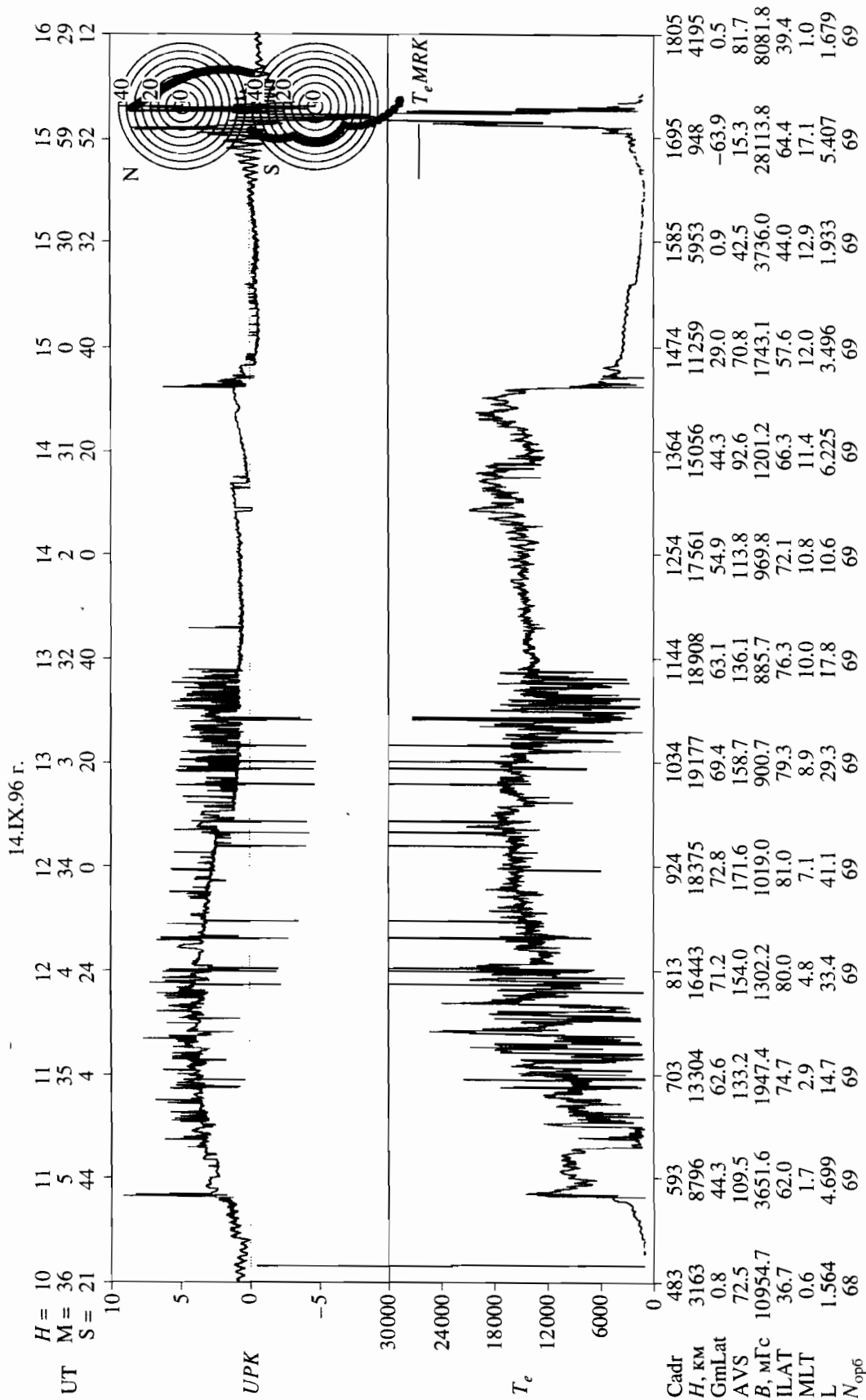


Рис. 8. Часть рис. 7, соответствующая одному полному витку. Вставки в верхней панели – круговые диаграммы Λ -MLT (инвариантная широта – магнитное меридиональное время) показывают расположение орбиты в северном полушарии (верхняя) и в южном (нижняя).

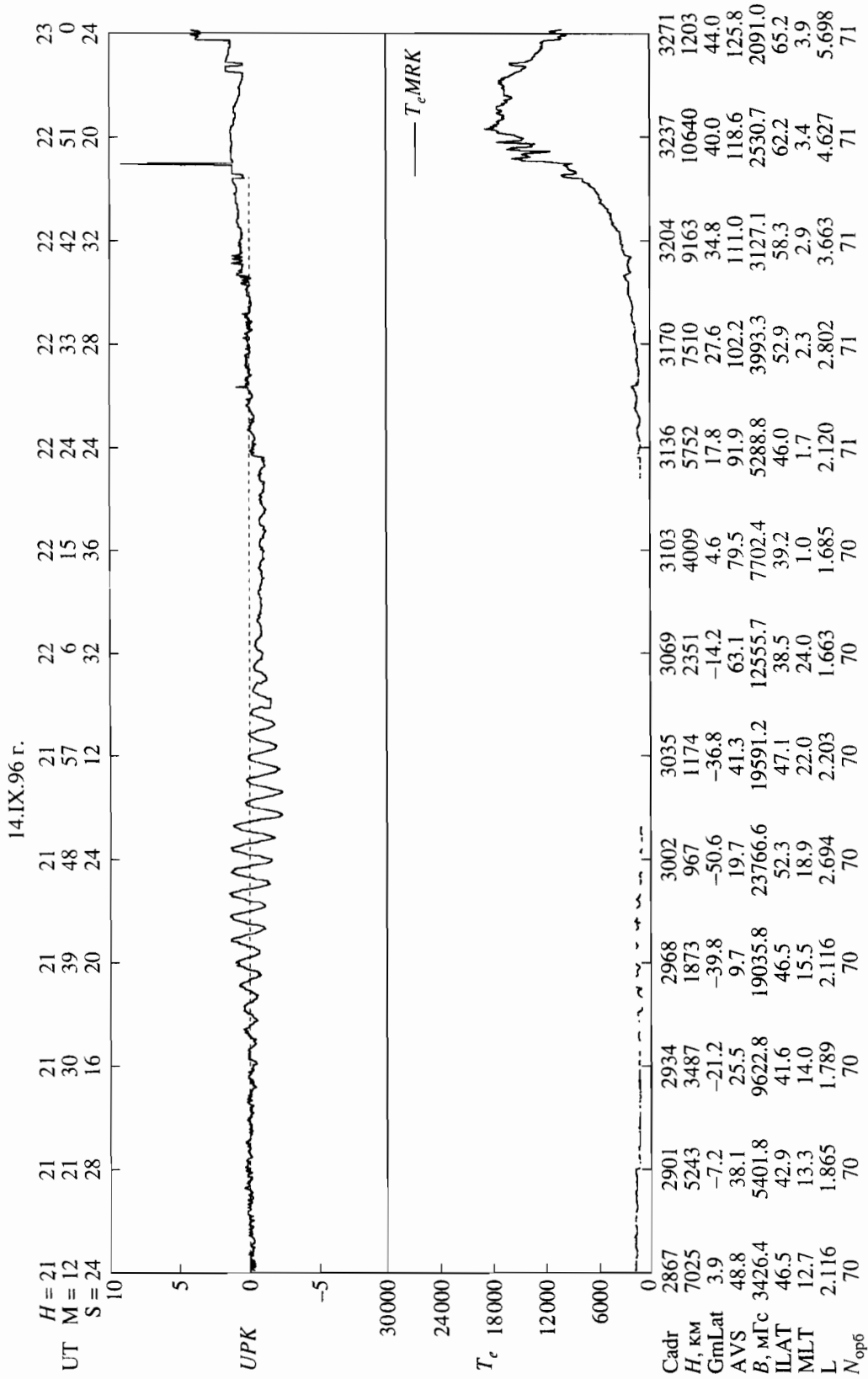


Рис. 9. Часть рис. 7, иллюстрирующая влияние засветки датчика ДЭТ-П на измеряемый квазипотенциал корпуса КА при нарушении ориентации КА.

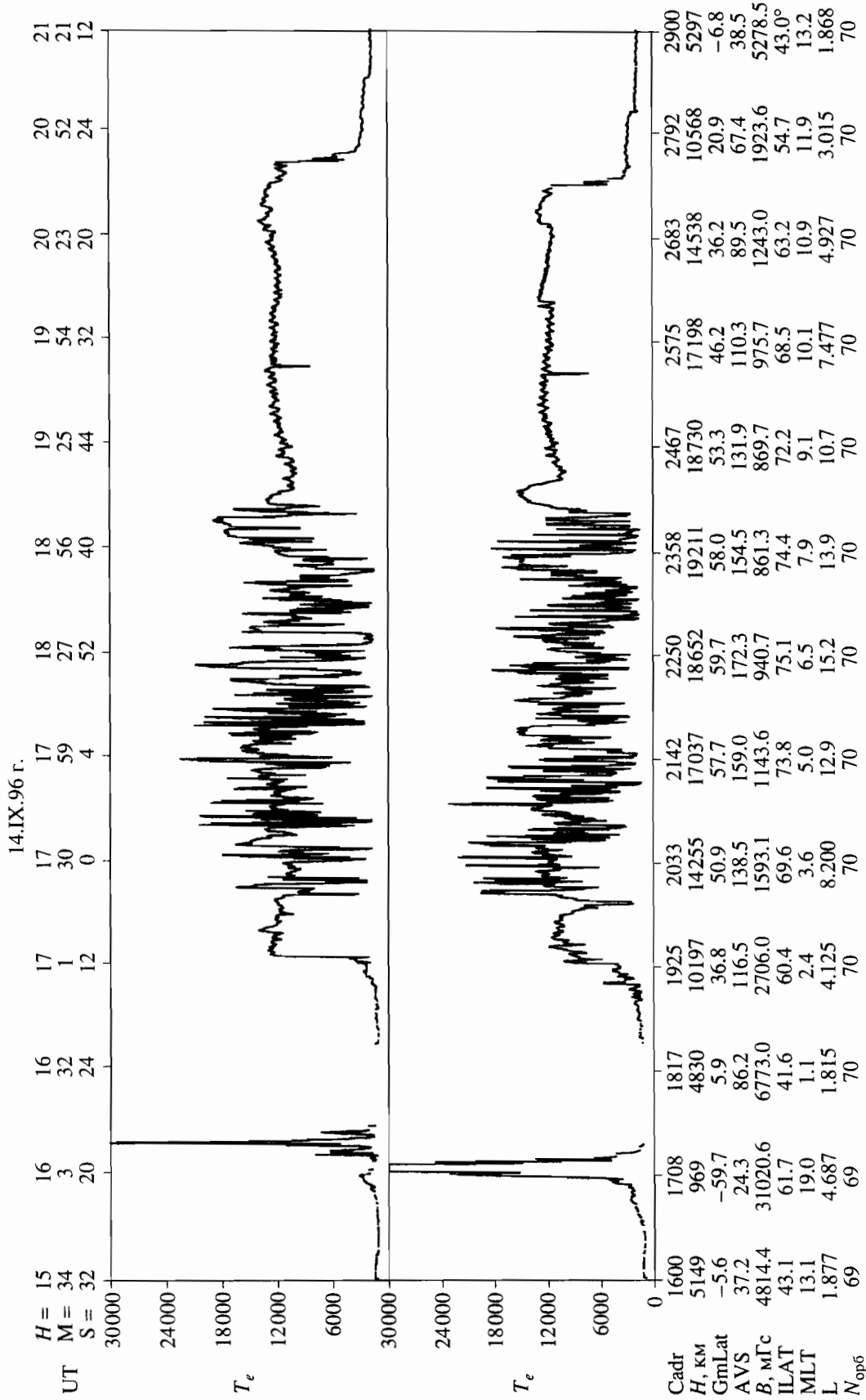


Рис. 10. Сравнение методом наложения эпох поведения T_e на двух орбитах с интервалом времени около 1 суток. Вверху участок орбит 73–74 с 14.37.00 до 20.24.00 15.IX.96 г. Внизу участок орбит 69–70, 15.34.00 до 21.21.00 14.IX.96 г. Время и орбитальные данные приведены для нижней панели.

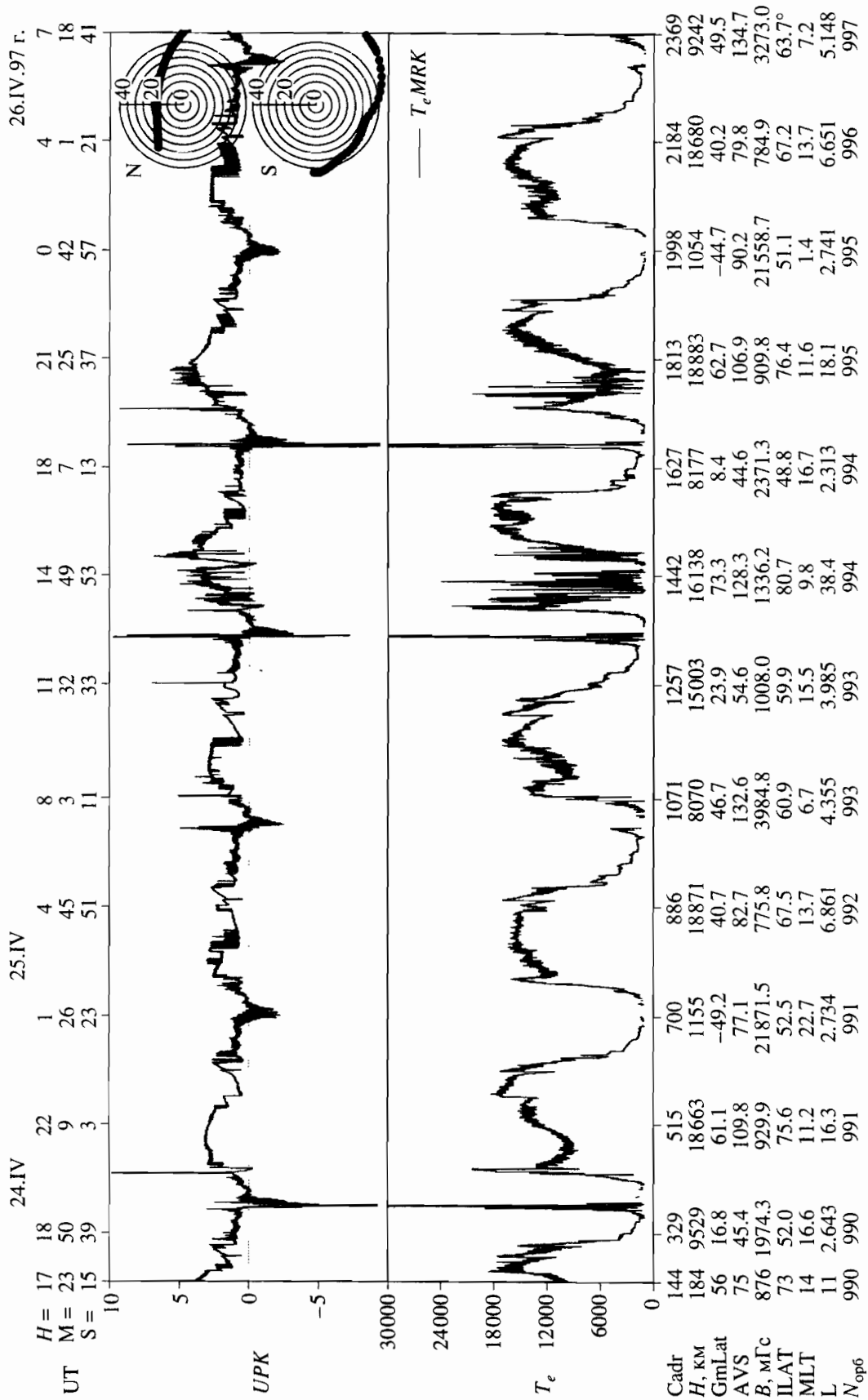


Рис. 11. Спокойное поведение T_e в авральной зоне на ряде орбит (24–25.IV.97 г.) в период, когда плоскость орбиты лежала примерно вдоль меридиана утром.

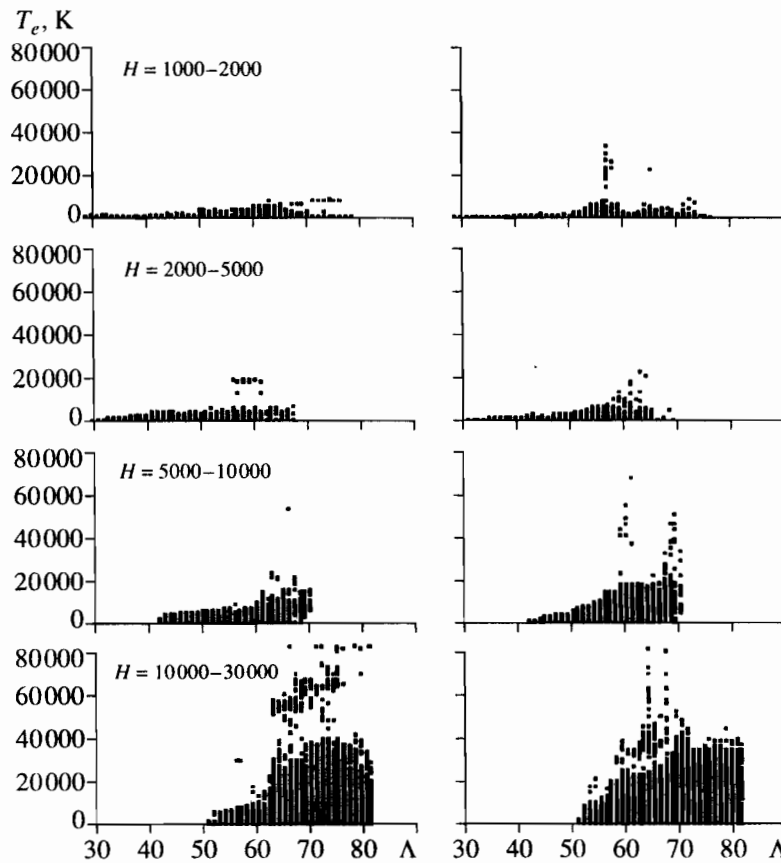


Рис. 12. Гистограммы широтных распределений T_e по инвариантной широте на разных высотах для спокойных (слева) и возмущенных условий (справа).

мерно на меридиан утро-вечер, такое разделение на флуктуирующую и спокойную зоны не наблюдалось. На рис. 11 так же, как и на рис. 7, показан ряд орбит за 24–25.IX.97 г. Практически во всей авроральной области наблюдается сравнительно спокойное поведение T_e .

В середине спокойного участка обеих орбит, показанных на рис. 10, виден узкий провал в величине T_e . Этот провал не является телеметрическим сбоем, как может показаться при рассмотрении одной орбиты. В обоих случаях минимум “прописан” несколькими точками, имеет подобную форму и расположен примерно в одном и том же месте: $L = 8.4/9.8$, $MLT = 9.8/9.5$, $\Lambda = 69.8/71.3$ (нижняя/верхняя панели). Кроме того, в записи параметра PK имеются соответствующие максимумы, как и следует ожидать при понижении T_e . По-видимому, это явление соответствует некоторой достаточно стабильной структуре в магнитосфере, существующей не менее суток.

Способность прибора КМ-7 проводить измерения T_e во всем диапазоне высот полета Авроральной зонда представляет уникальную возможность проследить высотную зависимость субаврорального максимума T_e . Это явление

представляет особый интерес, поскольку в настоящее время, несмотря на многочисленные эксперименты, отсутствует ясное понимание механизмов образования СМ T_e и связанного с ним главного ионосферного провала. На рис. 12 показан пример попытки проанализировать высотную зависимость широтных распределений T_e . На всех 8 панелях наложены друг на друга широтные распределения T_e по 7 геомагнитно-спокойным сеансам ($D_{st} > -20$ нТ, слева) и 7 возмущенным сеансам ($D_{st} < -20$ нТ, справа). Несмотря на то, что этот анализ сугубо предварительный, данные не проверены на отсутствие телеметрических сбоев, из рисунка видно, что в целом T_e возрастает с высотой, а в области $\Lambda \geq 60^\circ$ в обоих случаях значительный рост T_e начинается в интервале высот 5000–10000 км, что свидетельствует о практически постоянном наличии в этой области процессов, приводящих к нагреву электронной компоненты холодной плазмы. На $h > 10000$ км часто наблюдается $T_e > 3$ эВ, причем в интервале $\Lambda = 65^\circ-75^\circ$ T_e иногда возрастает до 7 эВ даже в спокойных условиях.

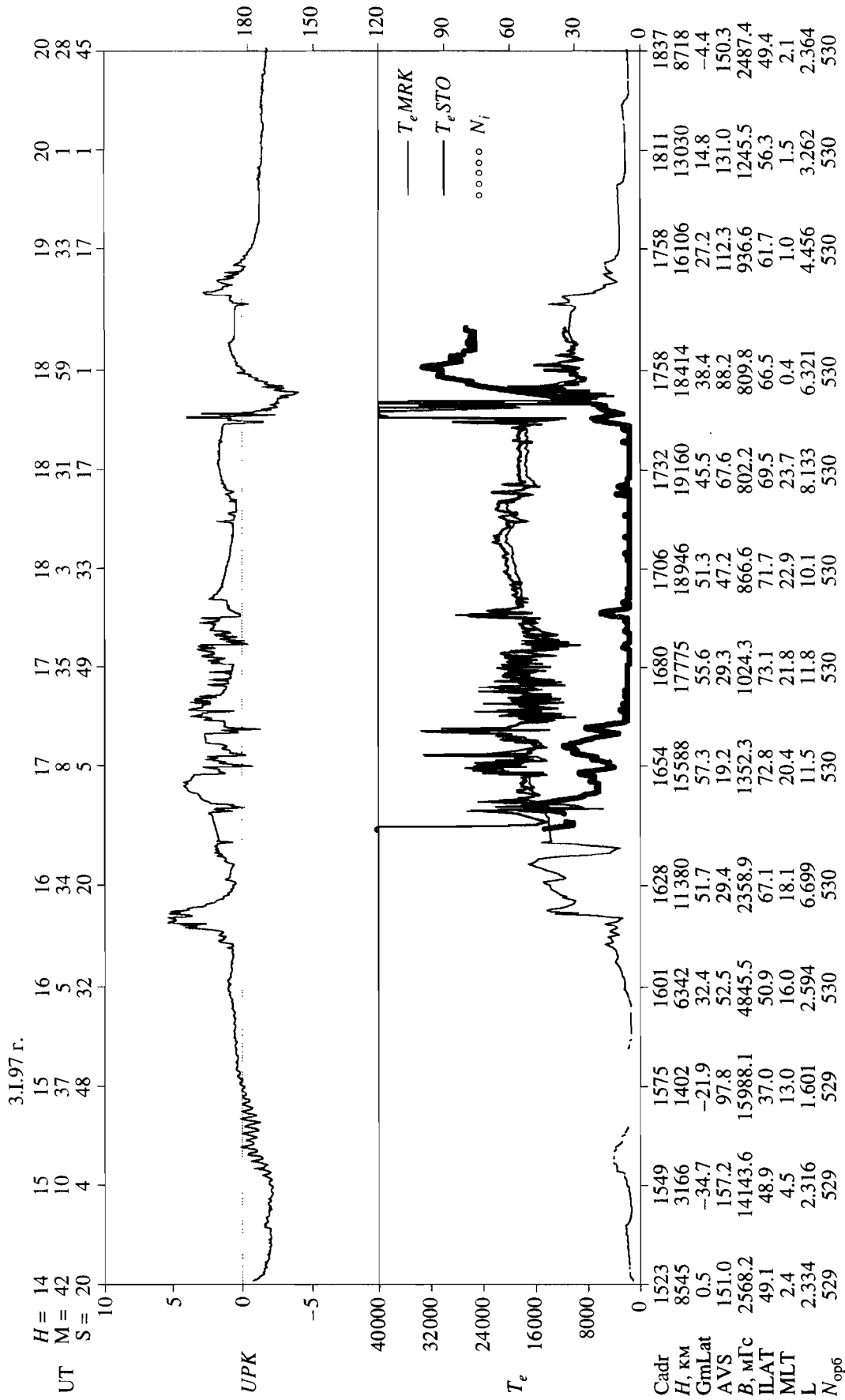


Рис. 13. Сравнение результатов измерений автоматической обработки на борту (передаваемых по MRK) и детальной обработки на Земле зондовых характеристик, передаваемых по линии STO. Параметр U2 (кривая N_i) пропорционален концентрации холодных ионов.

Выше кратко описаны предварительные результаты автоматической обработки результатов измерений на борту, передаваемые по аналоговым каналам РТК. При автоматической обработке на борту не проводится проверка качества измеренных данных. Такая проверка возможна на Земле по более подробным данным, передаваемым по линии СТО. Кроме того, данные СТО позволяют определять величины потока ионов на зонд, что в свою очередь позволяет при наличии данных по массовому составу и энергетическим распределениям ионов (или при использовании соответствующих предположений) оценить концентрацию ионов. На рис. 13 проводится сравнение результатов обработки на борту с первыми результатами наземной обработки данных СТО. На нижней панели приведены кривые T_e , полученные по каналам РТК и СТО и величина U_2 , пропорциональная потоку холодных ионов на зонд, представляющая ход концентрации вдоль орбиты КА; эта кривая показана точками и обозначена как N_i . Высота на всем протяжении авроральной зоны $h > 14000$ км. Обе кривые T_e хорошо согласуются между собой. В связи с малой длительностью сеансов СТО кривая N_i получена в данном случае во всей северной авроральной зоне и лишь слегка захватывает периферийные части плазмосферы. Тем не менее, из рисунка отчетливо видно увеличение концентрации по мере углубления в плазмосферу. В вечернем секторе (слева) плазмосфера не имеет четкой границы, спад концентрации немонокотный; отдельные "облака" холодной плазмы наблюдаются вплоть до $L = 21$. Видно изолированное облако на $L = 22$. В ночном секторе видна четкая резкая граница на $L = 6-7$. Такое поведение потока ионов на зонд (кривой N_i) соответствует хорошо известному поведению плазмосферы – как правило, резкая граница в ночном секторе и размытая граница в вечернем секторе на более высоких, чем в ночном секторе значениях L -параметра. Из показаний прибора очевидно, что определяемая прибором температура электронов соответствует тепловой компоненте; о величине ионного потока этого сказать нельзя. Однако вышеуказанное качественное совпадение хода кривой N_i с поведением плазмосферы позволяет считать, что эта кривая правильно отражает вариации концентрации тепловых ионов.

У "основания" плазмосферы в ночном секторе наблюдается очень резкий максимум T_e . Этот максимум является проявлением впервые зарегистрированной в электронной компоненте так называемой "горячей зоны" плазмосферы [5], наблюдаемой на периферии плазмосферы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведено описание прибора КМ-7, его работы в полете, и проанализированы первые результаты измерений с точки зрения достоверности получаемых результатов измерения параметров холодной плазмы на наддионосферных высотах. Прибор правильно реализует методику измерений и позволяет получать надежные данные по температуре тепловых электронов по крайней мере до высот апогея ($\approx 20\ 000$ км, $R \approx 4$). В плотных слоях ионосферы в силу аппаратных ограничений величина T_e может несколько занижаться, однако прибор показывает качественно правильную картину распределения T_e вплоть до ионосферных высот. Кроме того, возможно определять величины потоков ионов на зонд, что в свою очередь позволяет при наличии данных по массовому составу и энергетическим распределениям (или при использовании соответствующих предположений) оценить величины концентраций. Качественное совпадение хода кривой величины потока ионов на зонд с поведением плазмосферы позволяет считать, что эта кривая правильно отражает вариации концентрации тепловых ионов.

Первые результаты обработки позволяют сделать следующие выводы.

1. В высокоширотных областях вне плазмосферы на $h > 10000$ км величина T_e составляет 1–3 эВ.
2. Практически во всей полярной области вне плазмосферы наблюдается сравнительно спокойное поведение T_e . Постоянной особенностью земной магнитосферы является наличие в послеполуночном секторе 00–09 MLT в интервале от $\Lambda \approx 60^\circ$ до $\Lambda \approx -80^\circ$ (максимальная широта орбит в данном случае) характерной зоны с сильно флуктуирующим поведением T_e .
3. В полярной области на $\Lambda \geq 60^\circ$ T_e возрастает с высотой как в спокойных, так и в возмущенных условиях. В обоих случаях значительный рост T_e начинается в интервале высот 5000–1000 км, что свидетельствует о практически постоянном наличии в этой области процессов, приводящих к нагреву электронной компоненты холодной плазмы. На $h > 10000$ км часто наблюдается $T_e > 3$ эВ, причем в интервале $\Lambda = 65^\circ-75^\circ$ T_e иногда возрастает до 7–8 эВ даже в спокойных условиях.
4. В полярной области магнитосферы на высотах до $\approx 3 R_E$ наблюдаются мелкомасштабные структуры, достаточно стабильные в масштабе времени порядка суток.
5. Ионосферный субавроральный максимум T_e прослеживается до высот 10000–13000 км с величиной T_e 10000–12000 К.
6. Впервые зарегистрирована в электронной компоненте так называемая "горячая зона" плазмосферы.

Работа проводилась в рамках Госконтракта с РКА №025-7535/94 и поддержана грантом INTAS-94-1695 и INTAS 96-2346. В подготовке эксперимента, наземных и натурных испытаниях принимали участие большие коллективы различных отделов ИКИ РАН и ИФА ЧАН, а также НПО им. Лавочкина, которым авторы выражают искреннюю признательность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Serbu G.P., Maier E.J.R.* Low-energy electrons measured on IMP-2 // *J. Geophys. Res.* 1966. V. 71. № 15. P. 3755.
2. *Freeman R., Norman K., Willmore A.P.* Electron density measurements in the thermal plasma of the magnetosphere using Langmuir probe // *Intercorrelated Satellite Observations* / Ed. by V. Manno and D.E. Page. Reidel, Dordrecht, 1970. P. 524.
3. *Brace L.H., Theis R.F., Dalgarno A.* The cylindrical electrostatic probes for Atmosphere Explorer-C, -D and -E // *Radio Science*. 1973. V. 8. № 4. P. 341-348.
4. *Афонин В.В., Гдалевич Г.Л., Грингауз К.И. и др.* Исследования ионосферы, проведенные при помощи спутника "Интеркосмос-2". III. Измерения электронной температуры в ионосфере методом высокочастотного зонда // *Космич. исслед.* 1973. Т. 11. № 2. С. 254-266.
5. *Bezrukich V.V., Gringauz K.I.* The hot zone in the outer plasmasphere of the Earth // *J. Atmosph. Terr. Phys.* 1976. V. 38. P. 1085.

First Results of Thermal Plasma Measurements in the *Auroral Probe* Mission (Experiment KM-7)

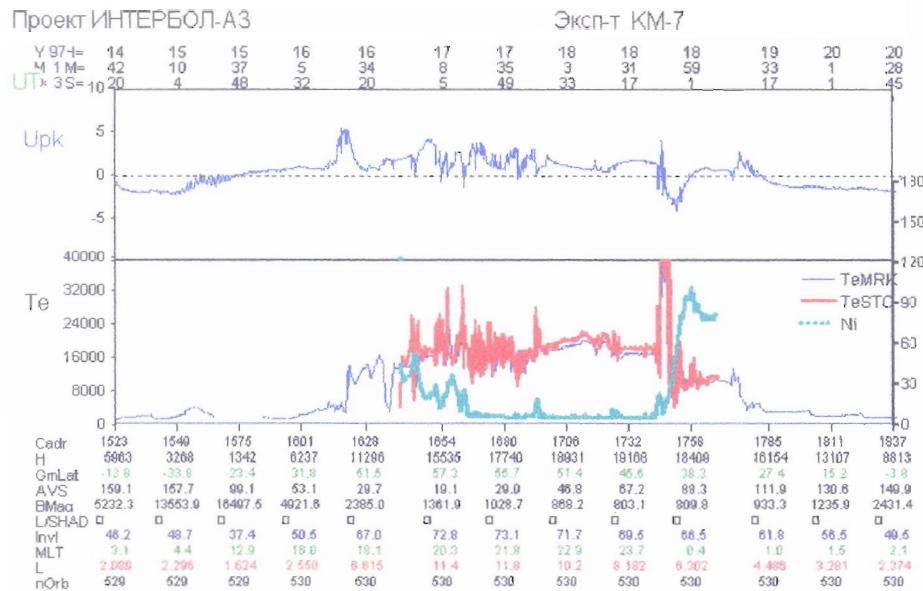
V. V. Afonin*, O. S. Akentieva*, J. Smilauer**, and I. Shimunek**

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

** *Institute of Atmosphere Physics, Prague, Czech Republic*

The KM-7 experiment is intended for measuring the electron temperature T_e of thermal plasma in outlying regions of the plasmasphere and in the auroral zone of the magnetosphere at altitudes of up to 4--5 Earth's radii. With a high-rate telemetry at hand, the fluxes of thermal ions are determined as a by-product parameter so that their density can be estimated.

для проверки качества измеренных данных. Такая проверка возможна по более подробным данным, передаваемым по линии СТО. Кроме того, данные СТО позволяют определять величины потока ионов на зонд, что в свою очередь позволяет оценить концентрацию ионов. На рис.13 проводится сравнение результатов обработки на борту с первыми результатами наземной обработки



данных СТО. На нижней панели приведены кривые Te, полученные по каналам РТК и СТО и величина U2, пропорциональная потоку холодных ионов на зонд, представляющая ход концентрации вдоль орбиты КА; эта кривая показана точками и обозначена как Ni. Высота на всем протяжении авроральной зоны $h > 14000$ км. Обе кривые

Рис.13. Сравнение результатов измерений автоматической обработки на борту (передаваемых по МРК) и детальной обработки зондовых характеристик, передаваемых по линии СТО на земле. Параметр U2 (кривая Ni) пропорционален концентрации холодных ионов.

В связи с малой длительностью сеансов СТО кривая Ni получена в данном случае во всей северной авроральной зоне и лишь слегка захватывает периферийные части плазмосферы. Тем не менее, из рисунка отчетливо видно увеличение концентрации по мере углубления в плазмосферу. В вечернем секторе (слева) плазмосфера не имеет четкой границы, спад концентрации немонотонный; отдельные “облака” холодной плазмы наблюдаются вплоть до $L = 21$. Видно изолированное облако на $L = 22$. В ночном секторе видна четкая резкая граница на $L = 6-7$. У “основания” плазмосферы в ночном секторе наблюдается очень резкий максимум Te. Этот максимум может быть либо проявлением (впервые зарегистрированном) так называемой “горячей зоны” плазмосферы или же это есть локальное явление, связанное с наблюдаемым в этом месте небольшим повышением Ni.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведено описание прибора КМ-7, его работа в полете и проанализированы первые результаты измерений с точки зрения достоверности получаемых результатов измерения параметров холодной плазмы на над-ионосферных высотах. Прибор правильно реализует методику измерений и позволяет получать надежные данные.

Работа проводилась в рамках Госконтракта с РКА №025-7535/94 и поддержана грантом INTAS-94-1695. В подготовке эксперимента, наземных и натурных испытаниях принимали