

УДК 537.213+533.9

ОЦЕНКА ПЛОТНОСТИ ЭЛЕКТРОНОВ В БЛИЖНЕЙ 3–4 R_E МАГНИТОСФЕРЕ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА СПУТНИКА *ИНТЕРБОЛ-2*

© 2023 г. Н. Ф. Смирнова^{1, *}, Г. Станев^{2, **}

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

²Институт космических исследований и технологий БАН, София, Болгария

*nsmirnova@romance.iki.rssi.ru

**gstanev@space.bas.bg

Поступила в редакцию 01.03.2022 г.

После доработки 05.05.2022 г.

Принята к публикации 26.07.2022 г.

Предлагается новый метод определения плотности электронов в разреженной плазме, основанный на одновременных измерениях потенциала спутника *Интербол-2* зондовыми приборами ИЭСП-2 (измеритель электрического поля) и КМ-7 (датчик электронной температуры). Это позволяет оценить плотность фотоэлектронного тока на основе процедуры, предложенной ранее авторами этой работы. Электронная концентрация определялась только для положительного потенциала космического аппарата. Составлялись уравнения баланса для спутника и зонда между токами электронов окружающей плазмы и фотоэлектронов, эмитированных освещённой поверхностью. В магнитосфере для приведения потенциала зонда к потенциалу окружающей плазмы в зонд направляется ток смещения, который учитывался в уравнении баланса токов для зонда. При расчетах использовалось значение энергии электронов $kT_e = 1$ эВ. Анализировались данные с ~ 350 орбит в авроральной зоне магнитосферы на высотах 2–3 R_E с октября 1996 по март 1998 г. в период низкой солнечной активности в начале 23-го цикла. Приводятся примеры рассчитанной плотности электронов, которая находится в пределах 1–30 см⁻³.

DOI: 10.31857/S0023420622700066, EDN: BVPTYA

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широко применяется метод определения концентрации окружающей плазмы в магнитосфере на основе измерений потенциала космического аппарата. Потенциал перестал быть только техническим параметром, а спутник, таким образом, стали использовать как зонд для определения плотности плазмы. Это произошло после того, как А. Педерсен (A. Pedersen) и его коллеги предложили определять концентрацию окружающей плазмы в магнитосфере на основе измерений потенциала датчиками электрических полей на *ISEE-1* (англ. International Sun/Earth Explorer) и других спутниках [1, 2]. В этих случаях потенциал был положительным порядка 20 В, плотность плазмы заключена в пределах 0.1–100 см⁻³. Если потенциал спутника положительный относительно потенциала плазмы, то в этом случае баланс токов осуществляется только между электронным током и фототоком. Плотность фотоэлектронного тока используется при оценивании плотности электронов. В настоящее время этот способ определения плотности

о окружающей плазмы был апробирован на многих космических аппаратах: *Viking*, *GEOS-1* (англ. Geostationary Operational Environmental Satellite), *GEOS-2*, *ISEE-1*, *CRRES* (англ. Clouds and the Earth's Radiant Energy System), *Geotail*, *Polar*, *Cluster*, *MMS* (англ. Magnetospheric Multiscale Mission).

Аппаратура спутника *Интербол-2* позволяет определить плотность фототока насыщения на основе сопоставления одновременных измерений электрического потенциала спутника относительно плазмы зондовыми приборами ИЭСП-2 и КМ-7 [3]. С учетом этого факта предлагается новый метод определения плотности плазмы по измерениям потенциала, когда не требуется проводить калибровку на основе сравнения с другими приборами. Потенциал спутника, как правило, определяется приборами для измерения электрических полей. Таким прибором на *Интербол-2* был ИЭСП-2 — измеритель электрических полей методом двойного зонда с использованием шести сферических датчиков, укрепленных на концах трех пар длинных штанг [4–7]. Самые длинные штанги, расстояние между сферами 25 м, уста-

новлены в плоскости вращения спутника и предназначены для измерения составляющих электрического поля E_y и E_z . Для определения E_x применяется третья пара штанг длиной ~ 4.5 м, которая направлена по оси вращения спутника. Прибор ИЭСП-2 определяет величину U_{sp} (разность потенциалов между спутником и зондом) для всех шести зондов. Измерения потенциала спутника представляются средними значениями ($U_{sp} = (U_{sp1} + U_{sp2})/2$), полученными для двух сфер, установленных на штангах по оси Y в плоскости вращения спутника. Зонды прибора ИЭСП-2 подвергались воздействию солнечного излучения. Потенциал спутника измерялся в диапазоне от -2 до $+13$ В. Для датчиков ИЭСП-2 использовались полые графитовые сферы радиусом 4 см с нанесением слоев из стеклогуглерода по оригинальной болгарской технологии.

Другим прибором, измеряющим потенциал спутника в диапазоне ± 10 В, был КМ-7, датчик электронной температуры [8]. Зонд прибора КМ-7 (полая металлическая сфера радиусом 6 см) был защищен экраном от воздействия УФ-эмиссии и установлен в антисолнечном направлении (вдоль оси вращения спутника) в середине длинной штанги в плоскости вращения спутника. Датчик КМ-7 был первым зондом Ленгмюра, который работал в магнитосфере и был экранирован от солнечного излучения.

Приборы ИЭСП-2 и КМ-7 методически идентичны, так как используют один и тот же тип датчика (сферический зонд Ленгмюра) и измеряют одну и ту же величину — разность потенциалов между спутником и зондом U_{sp} . Величину U_{sp} можно использовать как значение потенциала спутника, если потенциал зонда лежит вблизи плазменного потенциала. Это условие выполняется в достаточно плотной плазме в ионосфере, а в магнитосфере для приведения электрического потенциала зонда к потенциалу окружающей плазмы в зонд направляется ток смещения. Отметим, что поверхность спутника *Интербол-2* была сделана эквипотенциальной, что является обязательным условием применения тока смещения [9].

Прототип ИЭСП-2, прибор ИЭСП-1 [6] летал на спутнике *Болгария-1300* в ионосфере. Так как ИЭСП-1 находился в плотной плазме, то ток смещения для его функционирования не применялся.

Ток смещения (I_b) — это созданный технически поток электронов с зонда на спутник (зд. положительный) или наоборот — с космического аппарата на зонд (отрицательный ток смещения). Если зонд находится в плазме с малой плотностью и подвергается солнечному излучению (как зонды ИЭСП-2), то ток смещения должен быть отрицательным, чтобы компенсировать поток фотоэлектронов с поверхности зонда. Существенным отличием приборов ИЭСП-2 и КМ-7

является тот факт, что ИЭСП-2 измеряет U_{sp} при постоянном отрицательном токе смещения, а КМ-7 снимает вольт-амперные (ВА) характеристики, регистрирующие 11 измерений U_{sp} при различных положительных значениях токов смещения (I_b варьирует от 153 до 0.15 нА). Таким образом, данные КМ-7 для потенциала спутника можно интерпретировать как измерения 11 приборов типа ИЭСП-2. Эта интерпретация позволяет сопоставлять измерения КМ-7 и ИЭСП-2. Измерения КМ-7 при любых значениях тока смещения правильно отображают вариации потенциала, так как зонд КМ-7 защищен от фототока. Сопоставление одновременных измерений потенциала спутника *Интербол-2* относительно плазмы приборами ИЭСП-2 и КМ-7 позволяет сделать вывод о корректности определения потенциала при данном токе смещения, а также оценить плотность фотоэлектронного тока [3].

Зондовые приборы ИЭСП-2 (измеритель электрических полей) и КМ-7 (датчик электронной температуры) были установлены на спутнике *Интербол-2* как отдельные приборы, но в процессе работы с данными выяснилось, что их можно рассматривать как комплекс аппаратуры для измерения параметров плазмы, который позволяет определить концентрацию окружающей плазмы.

Определение концентрации электронов на основе измерения потенциала спутника относительно плазмы возможно только для положительного потенциала по методике, предложенной Педерсеном. Так как ИЭСП-2 функционировал в ближней магнитосфере, то он имел положительный и отрицательный потенциал на высотах более 8000 км и измерения потенциала проводились с током смещения, поэтому необходим дополнительный анализ для проверки знака потенциала и правильного выбора тока смещения.

Потенциал *Интербола-2* также рассчитывался по данным комплекса аппаратуры Альфа-3 (широкоугольный модуляционный анализатор ионов и анализатор ионов с тормозящим потенциалом), предназначенным для исследования плазмосферы. По данным Альфа-3 внутри плазмосферы потенциал космического аппарата всегда отрицательный и может достигать -5.0 В, при перемещении спутника к плазмопаузе его потенциал возрастает [10].

Ранее предпринималась попытка определения концентрации электронов на основе данных измерения потенциала спутника *Интербол-2* прибором ИЭСП-2 [11]. В этом исследовании формально применялись формулы из работы [2], поэтому авторы сознавали ограниченную точность абсолютных величин плотности, но смогли сделать некоторые выводы об относительных вариациях этого параметра. Концентрация электронов в этом исследовании определяется с интервалом

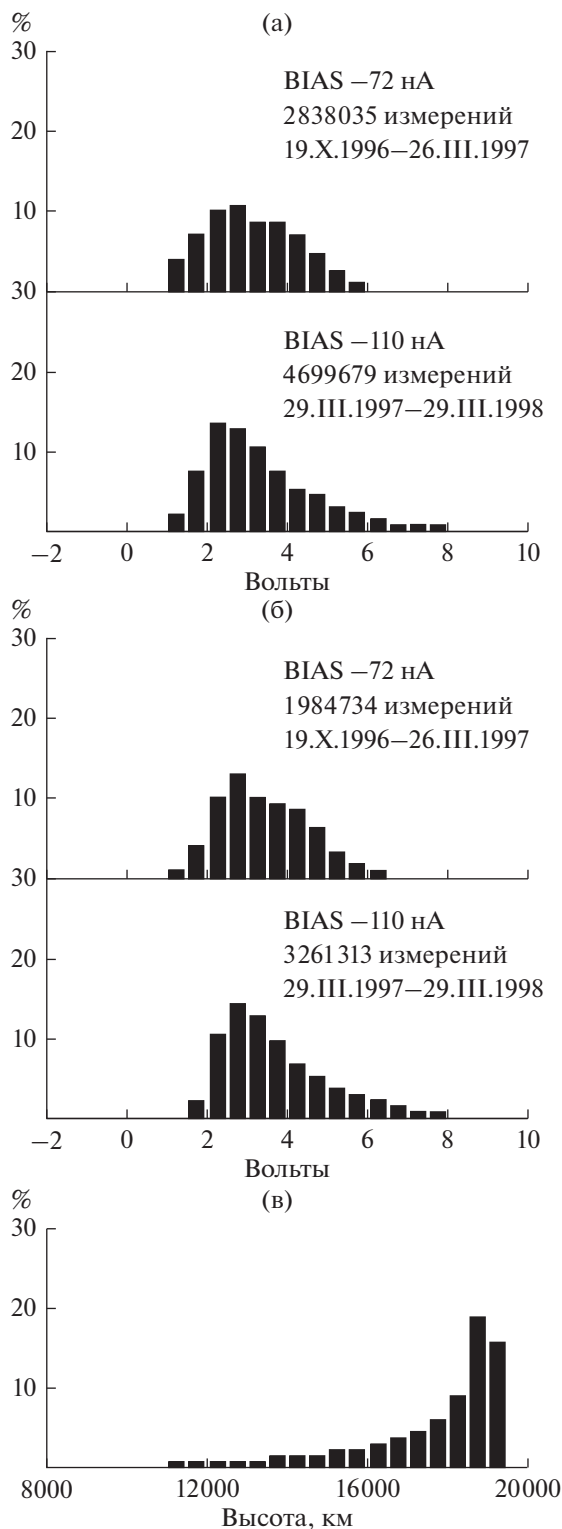


Рис. 1. Гистограммы результатов измерения потенциала *Интербола-2* прибором ИЭСП-2 с использованием всех измерений (а) и только измерений с корректным током смещения (б), гистограммы высот (в). ИЭСП-2 определяет потенциал правильно в большинстве случаев (~80%) по измерениям на высотах более 16000 км.

38 с и составляет $1\text{--}40\text{ см}^{-3}$, но согласно замечанию авторов, эти результаты требуют дальнейших рассмотрений. Однако с тех пор других публикаций по этому вопросу не было.

В настоящей работе будет рассмотрена новая методика для определения плотности электронов в авроральной зоне ближней магнитосферы $3\text{--}4R_E$, которая основана на одновременных измерениях потенциала спутника *Интербол-2* зондовыми приборами ИЭСП-2 (измеритель электрического поля) и КМ-7 (датчик электронной температуры).

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕКТНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПОТЕНЦИАЛА ПРИБОРОМ ИЭСП-2

Потенциал измерялся прибором ИЭСП-2 с частотой опроса 400 мс (телеметрия СТО – специальная телеметрическая система), а также с интервалами 16 и 64 с (телеметрия ССНИ – системы сбора научной информации). Для тех орбит, когда имеются данные, полученные при помощи СТО и ССНИ, результаты в целом совпадают с той лишь разницей, что измерения с частотой опроса 400 мс показывают более мелкомасштабные вариации. Разность потенциалов, измеренная прибором ИЭСП-2 между спутником и зондом U_{sp} можно использовать как значение потенциала спутника V_s , если ток смещения I_b был выбран корректно. ИЭСП-2 функционировал с начала полета до конца марта 1997 г. с $I_b = -72\text{ нА}$, а затем с $I_b = -110\text{ нА}$ до окончания миссии.

Так как зонд прибора КМ-7 без фототока (закрыт экраном), то совпадение вариаций $U_{sp}/\text{ИЭСП-2}$ и $U_{sp}/\text{КМ-7}$ показывает, что прибор ИЭСП-2 функционирует с корректным током смещения. Проанализированы данные, полученные с ~350 орбит за ~800 ч совместного включения ИЭСП-2 и КМ-7 при работе телеметрии СТО на высотах от 8000 км (частота опроса ИЭСП-2 400 мс, а цикл работы КМ-7 – 5.12 с). Это сопоставление показало, что ~70% результатов определения потенциала спутника прибором ИЭСП-2 дают правильные значения, причем большинство (~80%) этих корректных измерений проводились на высотах от 16000 км до высоты апогея (19211 км). По результатам измерений ИЭСП-2 с корректным током смещения потенциал *Интербола-2* находится в основном в диапазоне 2–5 В.

На рис. 1 показаны гистограммы результатов измерения потенциала прибором ИЭСП-2 на ~350 участках орбит с учетом всех измерений (а) и только измерений с корректным током смещения (б). Из гистограммы высот (в) видно, что ИЭСП-2 определяет потенциал правильно в большинстве случаев (~80%) по измерениям на высотах более 16000 км.

Отметим, что V_s определяется средним значением разности потенциалов U_{sp1} и U_{sp2} между спутником и сферическими зондами Y_1 и Y_2 на концах штанги Y в плоскости вращения спутника. Для определения концентрации электронов используются измерения, для которых выполняется $abs(U_{sp1} - U_{sp2}) < 0.5$ В, т.е. составляющая электрического поля $E_y < 20$ мВм⁻¹ (длина штанги 25 м). Статистический анализ показал, что происходит возрастание поперечного электрического поля в Y -направлении с увеличением потенциала спутника. Можно сделать вывод об увеличении $abs(U_{sp1} - U_{sp2})$ с ~ 0.5 до ~ 1 В с возрастанием потенциала спутника, но для большинства измерений выполняется условие $abs(U_{sp1} - U_{sp2}) < 0.5$ В. Если $V_s < 6$ В, то в этом случае для $\sim 80\%$ корректных измерений выполняется условие $abs(U_{sp1} - U_{sp2}) < 0.5$ В. Этот факт следует учитывать при анализе результатов измерения потенциала спутника V_s .

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРОННОГО ТОКА

Сопоставление одновременных измерений потенциала спутника *Интербол-2* относительно плазмы приборами ИЭСП-2 и КМ-7 позволяет оценить плотность фотоэлектронного тока [3]. Это является важным фактором, так как его величина сильно варьируется. Приведем табл. 1, в которой показаны значения плотности фотоэлектронного тока, определенного в различных проектах. Спутники, указанные в этой табл. 1, имеют эквипотенциальную поверхность.

Интенсивность фотоэмиссии спутника меняется приблизительно в два раза с изменением солнечной активности, а также увеличивается со временем нахождения на орбите магнитосферных аппаратов. Для *Интербола-2* эти эффекты анализируются в [17]. На спутнике *Интербол-2* в авроральной зоне магнитосферы на высотах $2-3R_E$ плотность фототока насыщения находится, как правило, в диапазоне $18-36$ мкА м⁻².

Фотоэмиссионные свойства зонда ИЭСП-2 и спутника *Интербол-2* можно считать одинаковыми, так как разность между плавающим потенциалом спутника и плавающим потенциалом зонда прибора ИЭСП-2 (в случаях, когда к зонду не применяется ток смещения) отличалась на доли вольта.

Процедура определения плотности фототока на основе сопоставления одновременных измерений электрического потенциала спутника относительно плазмы приборами ИЭСП-2 и КМ-7 подробно изложена в статье [3]. Коротко поясним разработанную методику. Приведем из этой статьи два рисунка, которые наглядно демонстриру-

Таблица 1. Плотность фотоэлектронного тока, определенная в различных проектах

Плотность фотоэлектронного тока, нА см ⁻²	Проект	Ссылка
2.1	Лабораторные измерения	[12]
1.3	Лабораторные измерения	[13]
3.0	<i>GEOS-1, GEOS-2</i>	[14]
2.0	<i>ISEE-1</i>	[14]
6.0	<i>GEOS-2</i>	[15]
5.0 или 8.0	<i>GEOS-1, ISEE-1</i>	[1]
5.2	<i>ISEE-1</i>	[2]
4.6–6.8	Спутники <i>Cluster</i>	[16]

ют процедуру определения фототока на основе сопоставления измерений ИЭСП-2 и КМ-7.

Предварительно отметим, что на рис. 2, 4, 6–8 приводится привязка данных к орбите, при этом принимаются следующие обозначения и единицы измерения: UT — универсальное время, ч.мин.с; MLT — магнитное местное время, ч.мин; LAT — инвариантная широта, град; L — параметр Мак-Илвейна (McIlwain); ALT — высота, км; LAT — географическая широта, град, от -90 до $+90$; LONG — географическая долгота, град, от 0 до 360 в.д.

Из рис. 2 видно совпадение вариаций $U_{sp}/\text{ИЭСП-2}$ и $U_{sp}/\text{КМ-7}$. Вариации всех кривых идеально совпадают за исключением измерений ИЭСП-2 с отсутствием тока смещения. Следовательно, мы можем мысленно сконструировать виртуальный зонд ИЭСП-2 в тени с постоянным током смещения, который вычисляем из ВА-характеристики КМ-7, показанной на рис. 3. Принимая во внимание различие в площади поверхности зондов S , так как $R_{\text{КМ-7}} = 6$ см, $R_{\text{ИЭСП-2}} = 4$ см, $S_{\text{КМ-7}}/S_{\text{ИЭСП-2}} = 2.25$, определяем электронный ток зонда ИЭСП-2 $I_e = I_b(\text{КМ-7})/2.25$. КМ-7 снимал 11 измерений за 5.12 с, частота опроса ИЭСП-2 400 мс, за это время снято ~ 12 измерений, они почти совпадают и выглядят как одна толстая линия (см. рис. 3), которой соответствует $I_b(\text{КМ-7}) \approx 100$ нА. В этом случае $J_{ph}^0 = (100/2.25 + 72)/S_{\text{ИЭСП-2}} \approx 2.35$ нА см⁻², так как освещенная солнцем поверхность зонда ИЭСП-2 $S_{\text{ИЭСП-2}} = S_{\text{ИЭСП-2}}/4 \approx 50.24$ см² и ток смещения $I_b = -72$ нА.

На рис. 3 демонстрируется типичная ВА-характеристика для орбит спутника *Интербол-2* с потенциалом $2-3$ В. На некоторых орбитах измерения потенциала прибором ИЭСП-2 за 5.12 с (время регистрации ВА-характеристики) могут сильно отличаться и не выглядеть, как одна тол-

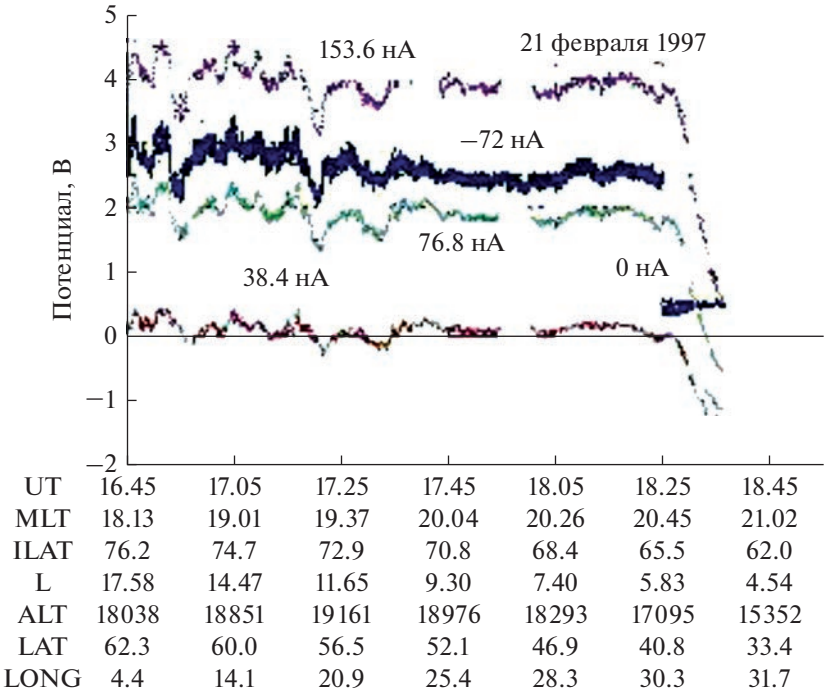


Рис. 2. Совпадение вариаций измерений потенциала приборами ИЭСП-2 при токе смещения -72 нА и КМ-7 при токах смещения $153.6, 76.8, 38.4\text{ нА}$. Вариации всех кривых идеально совпадают за исключением измерений ИЭСП-2 с отсутствием тока смещения.

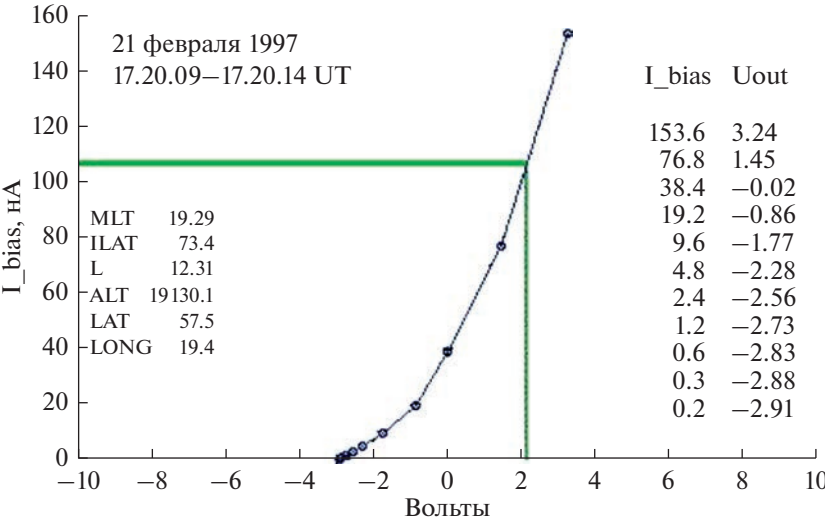


Рис. 3. Типичная ВА-характеристика с прибора КМ-7, зарегистрированная 21.II.1997 на орбите 733. Толстая линия демонстрирует все измерения потенциала прибором ИЭСП-2 за время регистрации этой ВА-характеристики.

стая линия. В таких случаях измерения ИЭСП-2 усредняются.

По результатам анализа измерений потенциала *Интербола-2* на различных орбитах можно сделать вывод, что существуют три основных типа характера поведения потенциала спутника:

- потенциал имеет небольшие значения $2\text{--}3\text{ В}$ и изменяется незначительно во время пролета (орбита 733, см. рис. 2, 3);

- потенциал резко возрастает в пике вверх (орбита 2336, рис. 4, 5);
- потенциал резко понижается в пике вниз (орбита 428, см. рис. 4, 5).

На рис. 4 демонстрируются совместные измерения потенциала приборами ИЭСП-2 и КМ-7 (при токах смещения $153.6, 76.8, 38.4\text{ нА}$), проведенные на орбитах 2336 (вверху) и 428 (внизу).

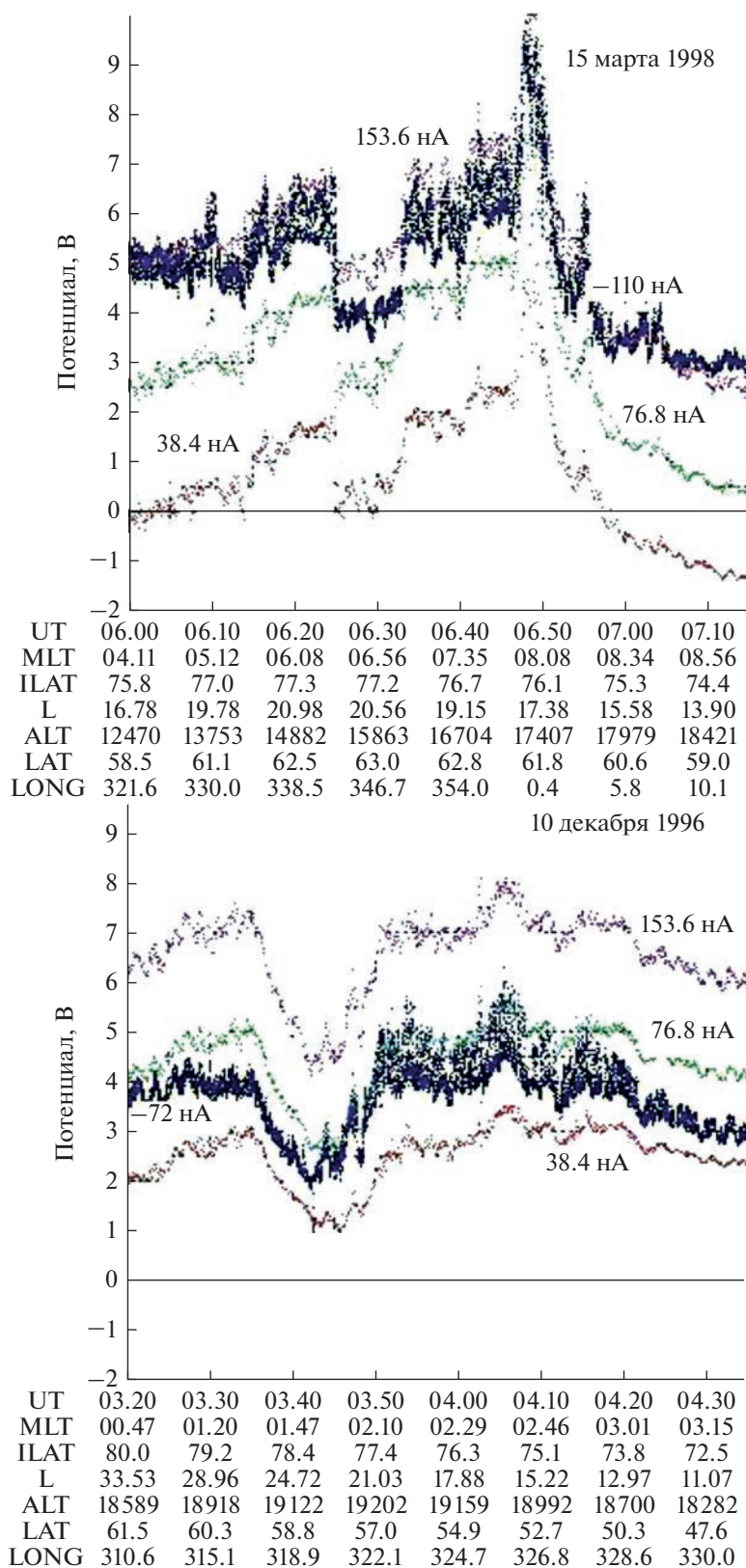


Рис. 4. Совместные измерения потенциала приборами ИЭСП-2 и КМ-7, проведенные 15.III.1998 на орбите 2336 (вверху) и 10.XII.1996 на орбите 428 (внизу).

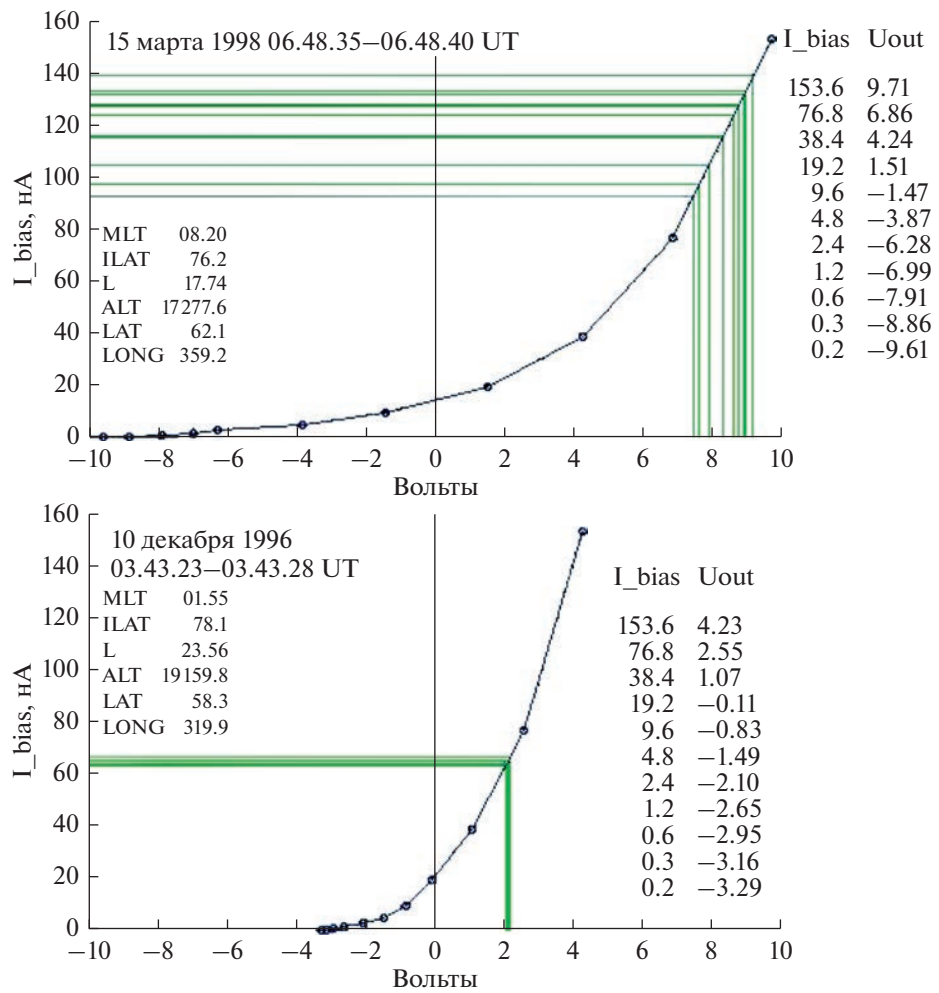


Рис. 5. ВА-характеристики, снятые КМ-7 совместно с измерениями потенциала спутника прибором ИЭСП-2, на орбите 2336 (вверху) и на орбите 428 (внизу).

На рис. 5 показаны ВА-характеристики с прибора КМ-7 в сопоставлении с измерениями потенциала ИЭСП-2 в момент регистрации пиков вверх на орбите 2336 (вверху) и вниз на орбите 428 (внизу).

Статистическое исследование показывает, что потенциал *Интербол-2* имеет значения в основном 2–5 В, но орбиты, когда потенциал не превосходит в какой-то момент времени 5 В, составляют не более 50%.

В этой работе рассматриваются данные измерений потенциала *Интербол-2*, полученные с октября 1996 по март 1998 г. при низкой солнечной активности. Излучение в L_{α} (1215 Å) за этот интервал времени увеличилось только на 10%. Этот период характеризуется слабой геомагнитной активностью: возмущения с $K_p > 7$ не наблюдались, а с $K_p = 7$ только 11 раз, а в среднем за цикл, согласно NOAA Space Weather Scales, $K_p = 7$ реги-

стрируются 200 раз. На основании этого можно сделать вывод, что анализируемые данные скорее характеризуют общие закономерности явлений в авроральной области на высотах 2–3 R_E , чем эффекты, связанные с космической погодой. Предполагается, что в следующих работах будет представлен подробный анализ результатов.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ
ЭЛЕКТРОНОВ В БЛИЖНЕЙ 3–4 R_E
МАГНИТОСФЕРЕ

Обсудим оценки плотности электронов, полученные на основе измерений потенциала спутника относительно плазмы зондовыми приборами ИЭСП-2 и КМ-7. Для определения концентрации электронов применяется методика Педерсена, основанная на эмпирической модели, связывающей плотность фототока (J_{ph} , мкА м⁻²) и вели-

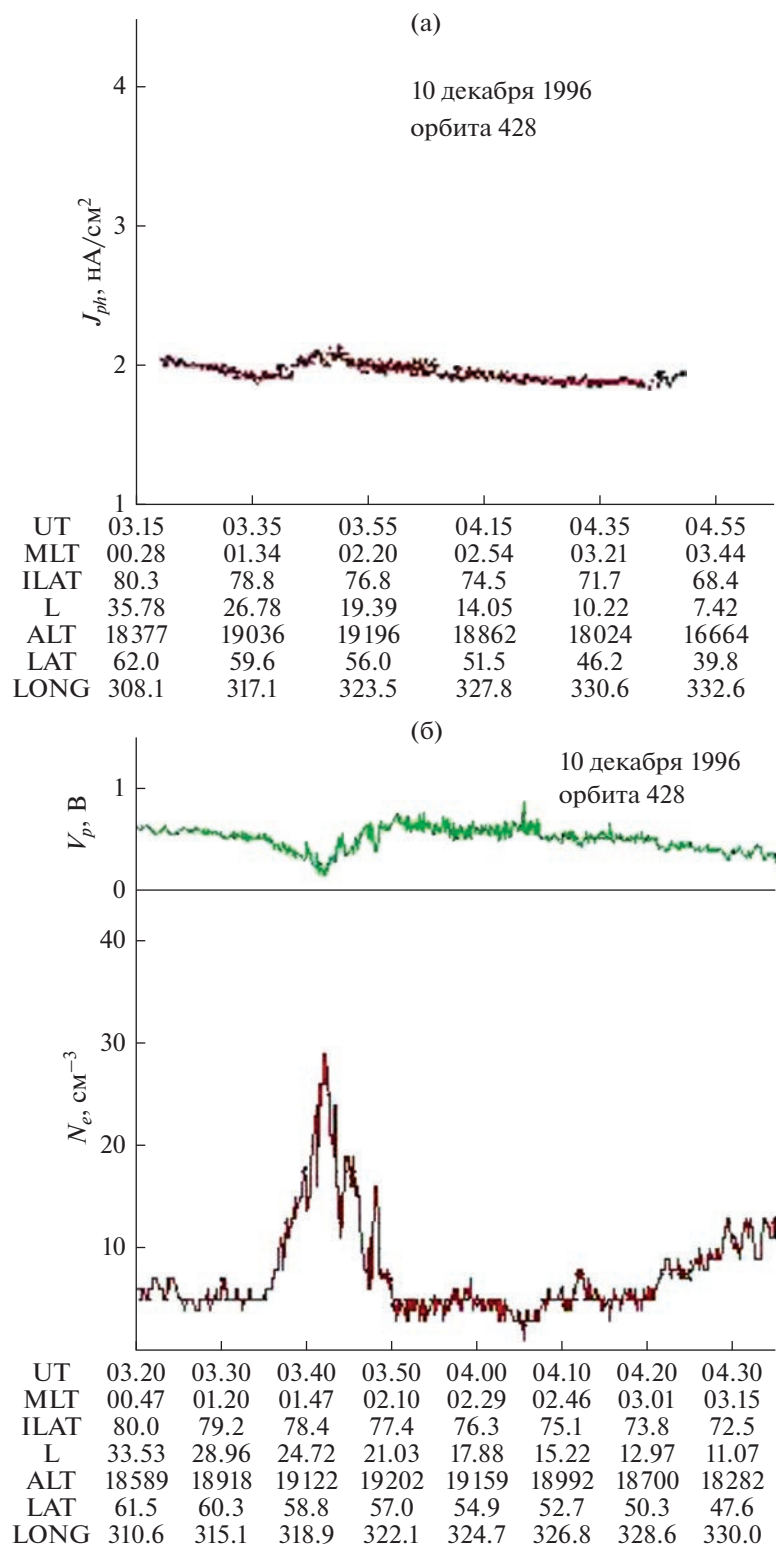


Рис. 6. Плотность фотоэлектронного тока на орбите 428 (а); плотность электронов плазмы (нижняя панель), V_p /ИЭСР-2 (верхняя панель) (б). *Интербол-2* находился в полярной шапке в интервале времени 03.20–04.40 UT, затем в авроральной зоне, индекс $K_p = 3$.

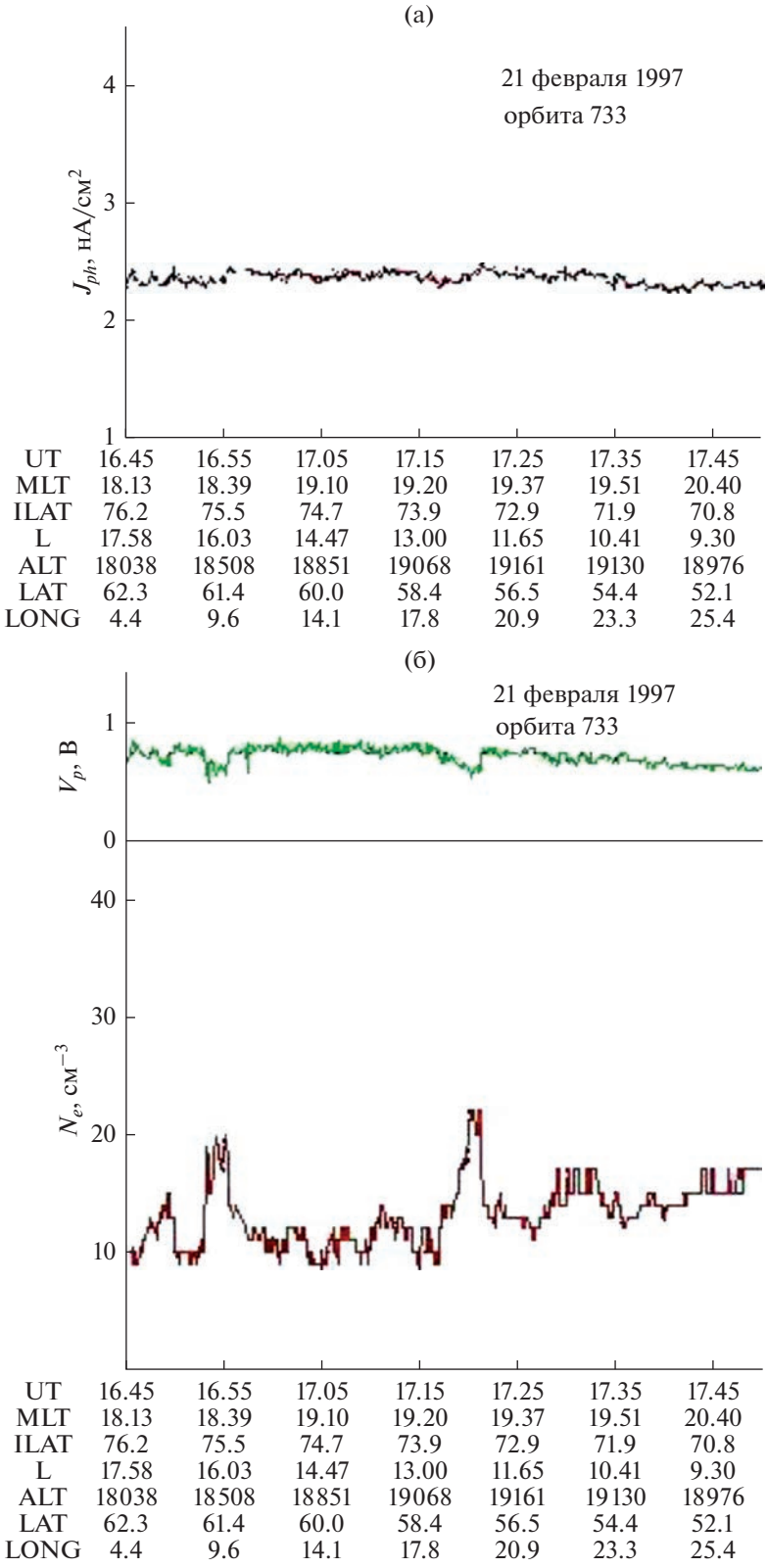


Рис. 7. Плотность фотоэлектронного тока на орбите 733 (а); плотность электронов плазмы (нижняя панель), V_p /ИЭСР-2 (верхняя панель) (б). *Интербол-2* находился в полярной шапке до 17.30 UT, затем в авроральной зоне, индекс $K_p = 2$.

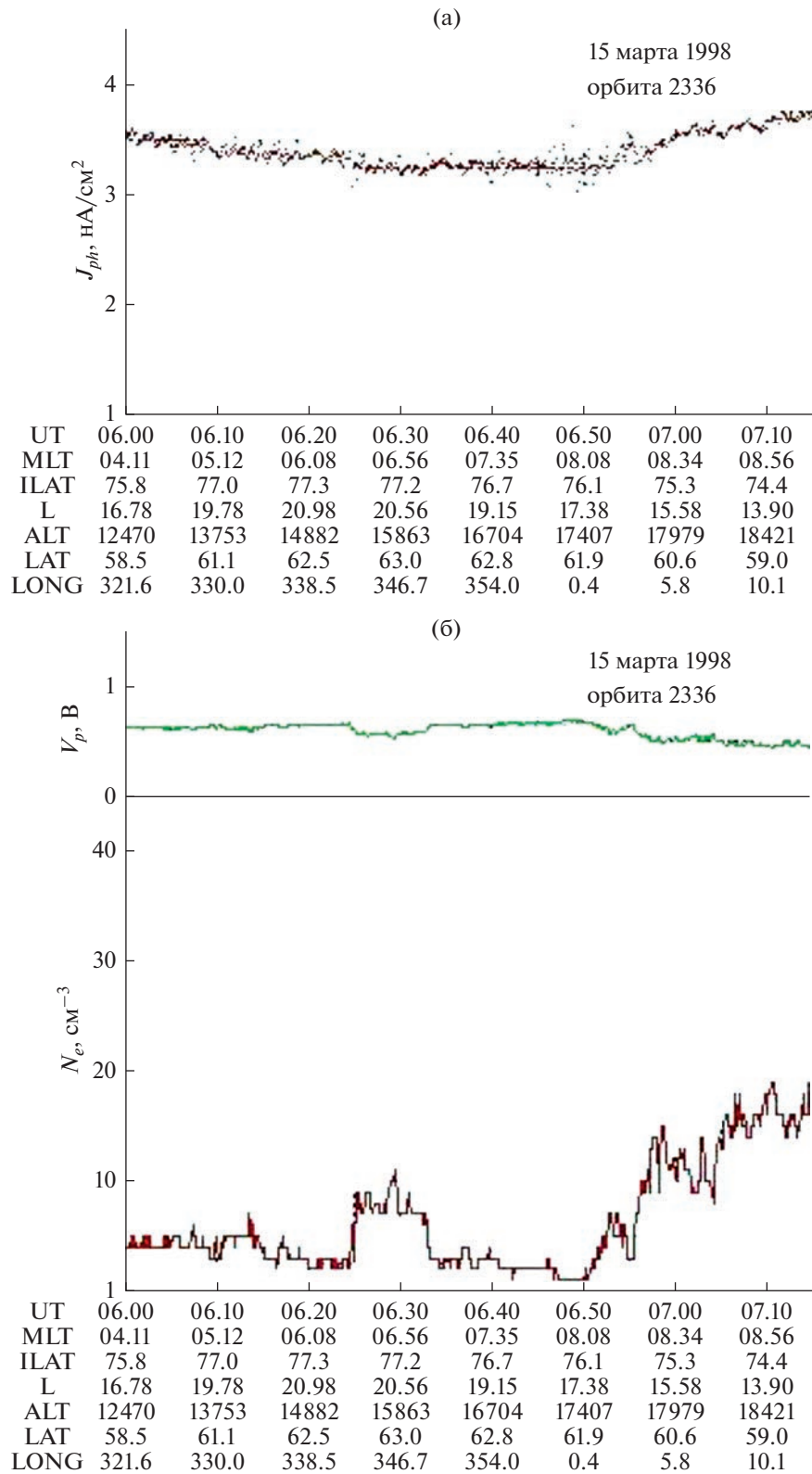


Рис. 8. Плотность фотоэлектронного тока на участке орбиты 2336 (а); плотность электронов плазмы (нижняя панель), V_p /ИЭСР-2 (верхняя панель) (б). *Интербол-2* находился в полярной шапке 05.50–07.20 UT. Индекс $K_p = 4$, наблюдалась слабая вспышка В7.2 06.10–06.22 UT.

чину потенциала (V ; $V > 0$) [1]. Эту модель можно записать в виде:

$$J_{ph}(V) = J_{ph0} [\exp(-V/2) + 0.0375 \exp(-V/7.5)], \quad (1)$$

где J_{ph0} — плотность фототока насыщения. В работе [1] $J_{ph0} = 80$ мкА м⁻². Если $V < 0$, то $J_{ph}(V) = J_{ph0}$, V — потенциал спутника или зонда.

В работе [18] применялась модификация этой модели, так как на спутнике *S3-3* (англ. Swiss Space Systems) зонд был покрыт аквадагом, поэтому использовалось $J_{ph0} = 18$ мкА м⁻² (согласно лабораторным измерениям). При оценивании плотности электронов на спутнике *Интербол-2* также используется модификация модели Педерсена, так как аппаратура позволяет оценить плотность фототока насыщения J_{ph0} на основе сопоставления одновременных измерений электрического потенциала спутника относительно плазмы зондовыми приборами ИЭСП-2 и КМ-7 [3]. Это существенно, так как фототок показывает большие вариации.

Фотоэмиссионные свойства магнитосферных космических аппаратов меняются со временем функционирования на орбите. В результате годичного пребывания спутника *Интербол-2* в космосе средняя плотность фотоэлектронного тока с его поверхности выросла приблизительно на 60% [17]. Потенциал *Интербола-2* имел положительные и отрицательные значения, но мы определяли концентрацию электронов окружающей плазмы только для положительного потенциала спутника.

Опишем процедуру определения плотности электронов на основе измерения электрического потенциала спутника *Интербол-2* зондовыми приборами ИЭСП-2 и КМ-7. Мы составляли уравнения баланса для спутника и зонда между токами электронов окружающей плазмы и фотоэлектронов, эмитированных освещенной поверхностью. *Интербол-2* имеет общую поверхность 40 м², а освещаемую солнцем — 13.2 м². В магнитосферных измерениях для приведения потенциала зонда к потенциалу окружающей плазмы в зонд направляется ток смещения, который учитывался в уравнении баланса токов для зонда. Плотность тока электронов плазмы J_e определяли по формуле, применимой для положительного потенциала:

$$J_e = (1 + eV/kT_e) N_e e (kT_e/2\pi m_e)^{1/2}, \quad (2)$$

где N_e и m_e — плотность электронов и масса электрона; k — постоянная Больцмана; e — заряд электрона; V — потенциал, причем в уравнении баланса $V = V_s$ для спутника и $V = V_p$ для зонда; $V_s = V_p = U_{sp}$, разность потенциалов между спутником и зондом, которая реально измеряется. При расчетах использовалось значение энергии электронов плазмы $kT_e = 1$ эВ. В работе [2] было установ-

лено, что N_e почти не зависит от электронной температуры в диапазоне значений 1–100 см⁻³. Предполагалось, что фотоэмиссионные свойства зонда и спутника можно считать одинаковыми. Из работ [16, 19] известно, что потенциал зонда V_p зависит от солнечной активности и приблизительно имеет значение 2.5 В в максимуме и ниже в минимуме солнечной активности. *Интербол-2* функционировал в глубоком минимуме солнечной активности. Наш алгоритм определения N_e построен следующим образом:

- задаем V_p в интервале (0.01–1.5 В), тогда $V_s = V_p + U_{sp}$, которое используем в уравнении баланса для спутника;
- определяем концентрацию N_s и N_p из уравнений баланса для спутника и зонда соответственно;
- проводим итерации методом золотого сечения (*Golden Search Technique*) [20] для определения подходящего V_p , при котором N_s и N_p мало различаются.

СРАВНЕНИЕ С РЕЗУЛЬТАТАМИ СПУТНИКА S3-3

Оценки плотности электронов, полученные на основе измерений зондовыми приборами на спутнике *Интербол-2*, дополняют результаты, проведенные на спутнике *S3-3*. Эти спутники функционировали в похожих геофизических условиях: *S3-3* был запущен летом 1976 г. в начале 21-го цикла солнечной активности, а *Интербол-2* — через три месяца после начала 23-го цикла. *S3-3* находился на полярной орбите (наклонение 97.5°) с перигеем 240 км и апогеем 8040 км, а *Интербол-2* — на орбите между перигеем 769 км и апогеем 19211 км (наклонение 62.8°). Плотность и температура плазмы на спутнике *S3-3* определялась по измерениям зонда Ленгмюра, который являлся частью волнового эксперимента и снимал ВА-характеристики. Параметры определялись с помощью подходящего подбора (*fitting procedure*) теоретической ВА-характеристики к экспериментальной, при этом учитывалась фотоэлектронная эмиссия. Отметим, что в работе [21], в которой проводится анализ измерений со спутника *S3-3*, для оценки плотности тока фотоэлектронов применялась более простая модель:

$$J_{ph}(V) = J_{ph0} \exp(-V_s/2.1), \quad (3)$$

где $J_{ph0} = 18$ мкА м⁻² для спутника *S3-3*.

Для определения концентрации электронов на основе измерений потенциала *Интербола-2* по этой модели (3) получаются такие же результаты, как с применением модификации модели Педерсена для этого спутника.

ПРИМЕРЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ

Плотность фотоэлектронного тока и концентрация электронов определялась на основе результатов измерений потенциала *Интербола-2* за период с октября 1996 по март 1998 г. в авроральной зоне магнитосферы на высотах $2-3R_E$. На рис. 2 и 4 демонстрируются совпадение вариаций измерений потенциала приборами ИЭСП-2 при токах смещения -72 нА (орбиты 428 (10.XII.1996), 733 (21.II.1997)) и -110 нА (орбита 2336 (15.III.1998)) и КМ-7 при токах смещения 153.6 , 76.8 , 38.4 нА. На рис. 6а, 7а и 8а показана плотность фотоэлектронного тока, которая определялась на основе сопоставления измерений потенциала U_{sp} зондовыми приборами ИЭСП-2 и КМ-7. Используется тот факт, что зонд КМ-7 защищен экраном от УФ-эмиссии, а зонды ИЭСП-2 нет. На рис. 6б, 7б и 8б на нижних панелях демонстрируется концентрация электронов, вычисленная на основе одновременных измерений U_{sp} /ИЭСП-2 и U_{sp} /КМ-7, а на верхних панелях значения потенциала зонда V_p /ИЭСП-2 (потенциал спутника $V_s = V_p/\text{ИЭСП-2} + U_{sp}/\text{ИЭСП-2}$).

ВЫВОДЫ

В работе рассматривается методика определения концентрации электронов на основе одновременного измерения потенциала спутника *Интербол-2* относительно плазмы зондовыми приборами ИЭСП-2 и КМ-7 в авроральной зоне ближней $3-4R_E$ магнитосферы.

Концентрация электронов определялась этим методом только для положительного потенциала, так как в этом случае баланс токов осуществляется только между электронным током и фототоком. Плотность фотоэлектронного тока используется при оценивании концентрации электронов. Потенциал спутника *Интербол-2* имел положительные и отрицательные значения, причем на высотах более 8000 км $\sim 75\%$ положительных значений.

Для определения концентрации электронов на основе измерений потенциала *Интербола-2* применяется простая модель: $J_{ph}(V) = J_{ph0} \exp(-V_s/2.1)$, где J_{ph0} определяется по данным измерений потенциала ИЭСП-2 и КМ-7; V_s — потенциал спутника.

Согласно нашим оценкам концентрация электронов в авроральной зоне $3-4R_E$ магнитосферы находится в основном в пределах $1-30 \text{ см}^{-3}$.

Аналоги приборов ИЭСП-2 и КМ-7 следует повторить на других магнитосферных спутниках с апогеем $3-4R_E$.

За предоставление результатов измерения ВАХ характеристик прибором КМ-7 авторы благодар-

ны В.В. Афонину и Я. Шмилауэру, ныне ушедшим из жизни.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pedersen A. Solar wind and magnetosphere plasma diagnostics by spacecraft electrostatic potential measurements // *Annales Geophysicae*. 1995. V. 13. P. 118–129.
2. Escoubet C.P., Pedersen A., Schmidt R. et al. Density in the magnetosphere inferred from ISEE-1 spacecraft potential // *J. Geophysical Research*. 1997. V. 102. Iss. A8. P. 17595–17609. <https://doi.org/10.1029/97JA00290>
3. Smirnova N.F., Stanev G. Determination of the photoelectron current density based on comparison between IESP-2 and КМ-7 probe measurements of the Interball-2 satellite // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2009. V. 49. Iss. 8. P. 1204–1207.
4. Bodnar L., Bouabdellah A., Perraut S. et al. INTERBALL (revised technical characteristics of the IESP experiment). Unpublished manuscript. 2001.
5. Perraut S., Roux A., Darrouzet F. et al. ULF wave measurements onboard the Interball Auroral probe // *Annales Geophysicae*. 1998. V. 16. Iss. 9. P. 1105–1116.
6. Stanev G.A., Petrunova M.N., Teodosiev D.K. et al. An Instrument for DC and AC electric and magnetic fields measurements aboard INTERCOSMOS Bulgaria 1300 Satellite // *Advances in Space Research*. 1983. V. 2. P. 43–47.
7. Теодосиев Д., Станев Г., Галев Г. и др. Сферические зонды для измерения электрических полей на спутнике *Интербол-2* в приборе ИЭСП-2М // *Космич. исслед.* 2000. Т. 38. № 6. С. 614–618 (*Cosmic Research*. P. 574–578).
8. Afonin V., Smilauer J. Experiment КМ-7 thermal plasma measurements in plasmasphere. INTERBALL: mission and payload. CNES-IKI-RSA. Toulouse, 1995. P. 309–312.
9. Kremnev R.S., Smirnov A.I., Gorkin S.S. Brief description of PROGNOZ-M2 spacecraft in the INTERBALL Project. INTERBALL: mission and payload. CNES-IKI-RSA. Toulouse. 1995. P. 76–80.
10. Безруких В.В., Бородкова Н.Л., Климов С.И. и др. Вариации потенциала космического аппарата на высокоэллиптических орбитах // *Космонавтика и ракетостроение*. 2003. Т. 30. № 1. С. 109–115.
11. Торкар К., Джезенски Г., Веселов М.В. и др. Измерение электрического потенциала спутника *Интербол-2* относительно плазмы и основанное на нем определение концентрации электронов // *Космич. исслед.* 1999. Т. 37. № 6. С. 644–653 (*Cosmic Research*. 1999. V. 37. № 6. P. 606–614).
12. Feuerbacher B., Fitton B. Experimental investigation of photoemission from satellite surface materials // *J. Applied Physics*. 1972. V. 43. Iss. 4. P. 1563–1571. <https://doi.org/10.1063/1.1661362>

13. *Grard J.* Properties of the satellite photoelectron sheath derived from photoemission laboratory measurements // *J. Geophysical Research*. 1973. V. 78. Iss. 16. P. 2885–2906.
<https://doi.org/10.1029/JA078i016p02885>
14. *Pedersen A., Cattell C.A., Flthammar C.-G. et al.* Quasi-static electric field measurements with spherical double probes on the GEOS and ISEE satellites // *Space Science Reviews*. 1984. V. 37. P. 269–312.
15. *Schmidt R., Pedersen A.* Long-term behavior of photoelectron emission from the electric field double probe sensors on GEOS-2 // *Planetary and Space Science*. 1987. V. 35. Iss. 1. P. 61–70.
[https://doi.org/10.1016/0032-0633\(87\)90145-0](https://doi.org/10.1016/0032-0633(87)90145-0)
16. *Pedersen A., Lybekk B., Andre M. et al.* Electron density estimations derived from spacecraft potential measurements on Cluster in tenuous plasma regions // *J. Geophysical Research*. 2008. V. 113. Art. № A07S33.
<https://doi.org/10.1029/2007JA012636>
17. *Смирнова Н.Ф., Станев Г., Мулярчик Т.М.* Исследование фотоэмиссии на спутнике *ИНТЕРБОЛ-2* в магнитосфере при низкой солнечной активности // *Физика Солнца и околоземного космического пространства*: тр. Всероссийской конф. по солнечно-земной физике, посвященной 100-летию со дня рождения чл.-корр. РАН В.Е. Степанова. Иркутск, 16–21 сент. 2013. Иркутск: изд-во ИСЗФ СО РАН, 2013. С. 203–205.
18. *Kletzing C.A., Mozer F.S., Torbert R.B.* Electron temperature and density at high latitude // *J. Geophysical Research*. 1998. V. 103. Iss. A7. P. 14837–14845.
19. *Lybekk B., Pedersen A., Haaland S. et al.* Solar cycle variations of the Cluster spacecraft potential and its use for electron density estimations // *J. Geophysical Research*. 2012. V. 117. Art. № A01217.
<https://doi.org/10.1029/2011JA016969.8>
20. *Химмельблау Д.* Эффективные методы одномерного поиска // *Прикладное нелинейное программирование*. М.: Мир, 1975. С. 50–58.
21. *Mozer F.S., Cattell C.A., Temerin M. et al.* The dc and ac electric field, plasma density, plasma temperature, and field-aligned current experiments on the S3-3 satellite // *J. Geophysical Research*. 1979. V. 84. Iss. A10. P. 5875–5874.
<https://doi.org/10.1029/JA084iA10p05875>