

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ГЕОМАГНЕТИЗМ
И
АЭРОНОМИЯ

Том XV

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

5

МОСКВА · 1975

УДК 521.61:550.388.2

ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ИОНОСФЕРЕ МЕТОДОМ ВЧ-ЗОНДА НА СПУТНИКАХ «ИНТЕРКОСМОС-2» И «ИНТЕРКОСМОС-8»

Я. Шмиллауэр, К. И. Грингауз, В. В. Афонин

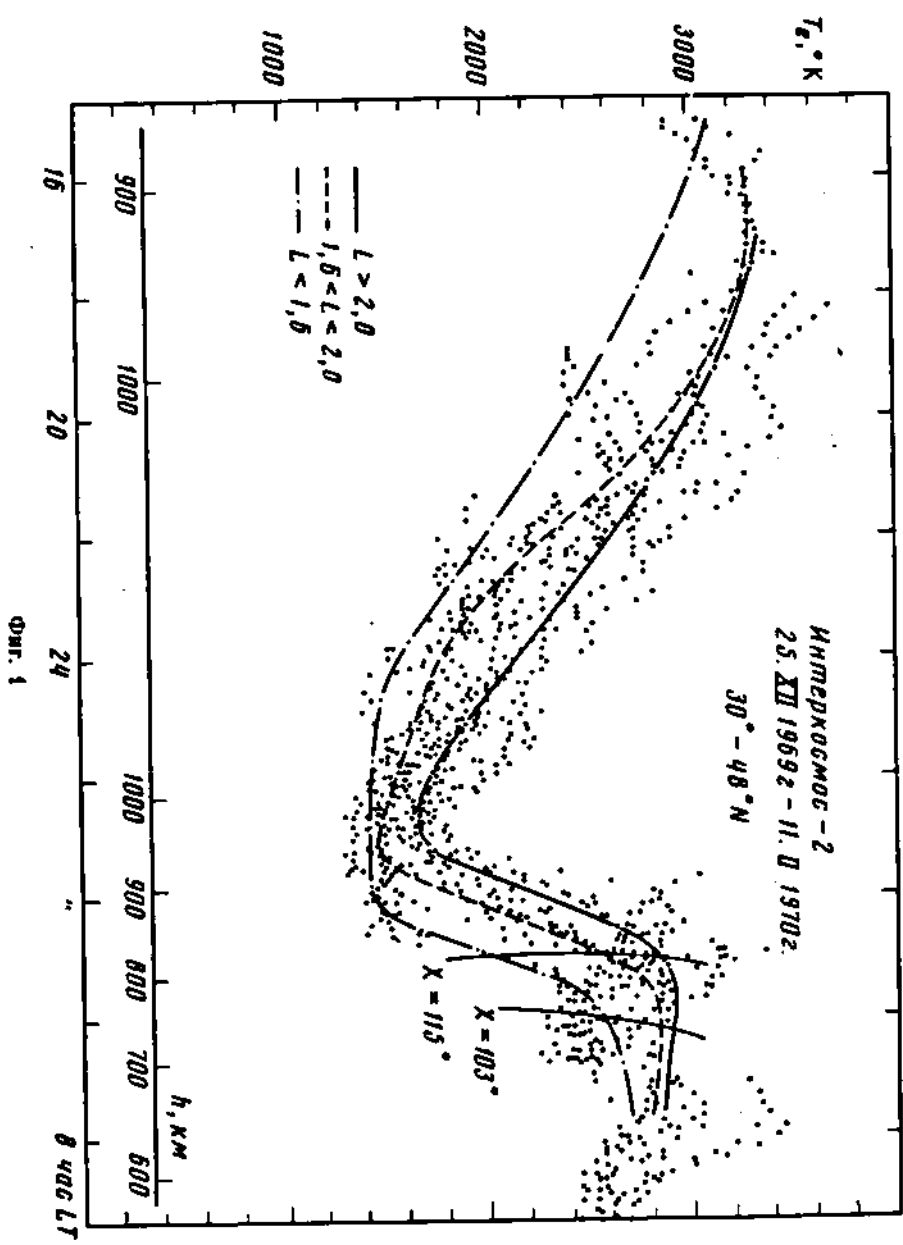
Приводятся результаты дальнейшей обработки данных по измерению температуры электронов в ионосфере на спутнике «Интеркосмос-2» и первые результаты, полученные на спутнике «Интеркосмос-8».

На спутниках «Интеркосмос-2» (запущенном 25.XII.1969 г. на орбиту с наклоном 49° , апогеем 1200 км и перигеем 210 км) и «Интеркосмос-8» (запущенном 30.XI 1972 г. на орбиту с наклоном 71° , апогеем 680 км и перигеем 210 км) были установлены приборы для измерения температуры электронов T_e методом ВЧ-зонда, примененным впервые в Японии в ракетных экспериментах [1]. На «Интеркосмосе-2» был установлен сферический, а на «Интеркосмосе-8» — плоский дифференциальные зонды. Методика измерений, проведенных на «Интеркосмосе-2», и часть полученных на этом спутнике результатов опубликованы в [2, 3]. В настоящем сообщении приводятся некоторые результаты дальнейшей обработки данных, полученных на спутнике «Интеркосмос-2», и предварительные результаты, полученные на спутнике «Интеркосмос-8».

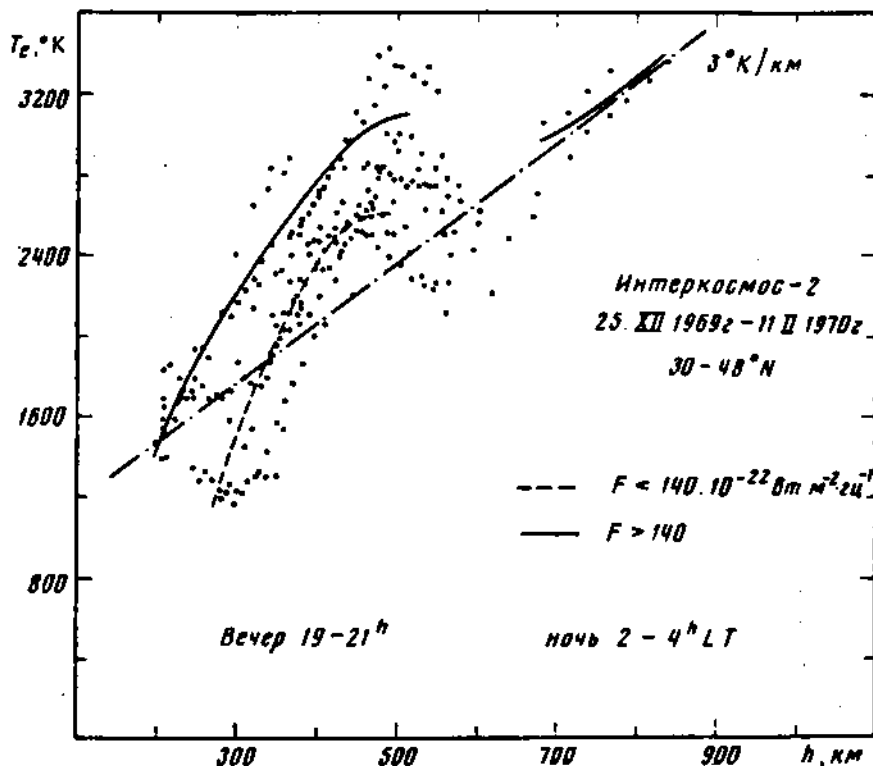
Обработка результатов измерений T_e на спутнике «Интеркосмос-2» проводилась в основном в двух направлениях: исследование морфологии электронной температуры на средних широтах северного полушария (по данным, полученным в сеансах непосредственной передачи со спутника) и изучение поведения T_e в экваториальной области (по данным, полученным при помощи запоминающего устройства).

Вращение плоскости орбиты Ω спутника «Интеркосмос-2» составляло $\sim 4,7^\circ$ в сутки, а аргумент перигея ω изменялся в день на $\sim 4,2^\circ$. Так как время активного существования спутника составило 47 суток, полное изменение Ω составило $\sim 220^\circ$, а изменение ω — около 200° . При проведении морфологических исследований это затруднило выделение некоторых закономерностей, поэтому, например, для периода вблизи местного полудня имеются данные только до ≤ 400 км. Спутник был запущен таким образом, чтобы можно было исследовать поведение ночной ионосферы, и в основном особенностей перехода от ночи к дню. Результаты этих исследований, включающие возрастания T_e при появлении потоков фотоэлектронов на магнито-сопряженной области, опубликованы в [3].

Кроме того, результаты обработки полученных данных были использованы для изучения зависимости электронной температуры в ночной области от местного времени. В условиях, когда отсутствуют локальные источники нагрева и потоки фотоэлектронов, электронная температура может превышать температуру нейтральных частиц T_n только в результате переноса тепла. В течение дня тепловая энергия заряженных частиц поступает в плазму, а ночью тепло поступает обратно к Земле и приводит к повышению температуры заряженных частиц (т. е. электронов на малых высотах). Объем этого «теплового резервуара» быстро возрастает с увеличением L -параметра; таким образом, при больших значениях L следует ожидать более высоких значений температуры и более медленного ее уменьшения в течение ночи.



Фиг. 1



Фиг. 2

Результаты измерений показаны на фиг. 1. Видно, что спад T_e с ростом местного времени для $1,6 < L < 2,0$ происходит значительно быстрее по сравнению с $L > 2,0$. Для $L < 1,6$ скорость спада T_e меньше. Однако необходимо учитывать, что в этом случае начальное значение температуры меньше и поэтому T_e довольно быстро приближается к T_n и T_e и дальнейшее охлаждение происходит более медленно. Меньшее значение начальной температуры обусловлено тем, что в диапазоне высот, в котором получены эти результаты, меньшие значения L -параметра соответствуют меньшим географическим широтам, на которых из-за более высокой электронной концентрации процесс охлаждения происходит с большей эффективностью. Нижним пределом полученных значений является $T_e \approx 1250^\circ \text{K}$, поэтому T_e близка к температуре нейтральных частиц (при вычислении T_e по модели Яккия-71 [4] величина $T_e - T_n \approx 150^\circ \text{K}$). Данные, по которым построена эта часть кривых, получены в сравнительно узком диапазоне высот $850 \div 1100$ км.

Другая интересная особенность фиг. 1 — зависимость начала предрассветного роста T_e от L -параметра. На фиг. 1 показаны кривые границ освещения высот 350 и 850 км (зенитные углы Солнца $\chi = 103$ и 115° соответственно при высоте экранирующего слоя 170 км) для типичных широт 35, 42 и 48° , соответствующих трем группам значений L . Видно, что локальные источники нагрева отсутствуют. Явная зависимость начала предрассветного роста T_e от L -параметра может быть просто объяснена значительными изменениями географической долготы магнитно-сопряженной точки из-за изменений географической широты в диапазоне долгот $20 \div 60^\circ \text{E}$, в котором получена основная часть данных. При изменении широты от 30 до 48°N приращение долготы в южном полушарии составляет $+10^\circ$. Это оз-

пачает, что на долготях $\sim 40^\circ$ Е фотоэлектроны появляются в наиболее северных областях значительно раньше.

На фиг. 1 видны два максимума — ранним утром и поздним вечером. Очень острый пик в утреннее время обусловлен гораздо большей скоростью нарастания интенсивности тепловых источников по сравнению с меньшей скоростью формирования механизма охлаждения (медленным ростом электронной концентрации). Кроме того, в этой области это явление «усиливается» влиянием высотного градиента температуры — данные для утренних и предполуденных часов получены в основном на высотах ~ 500 км. Максимум в начале вечера можно объяснить аналогично — при наличии большого потока тепла из плазмосферы происходит резкое уменьшение электронной концентрации. В этом случае высотный градиент температуры оказывает противоположный эффект, вызывая понижение величины максимума.

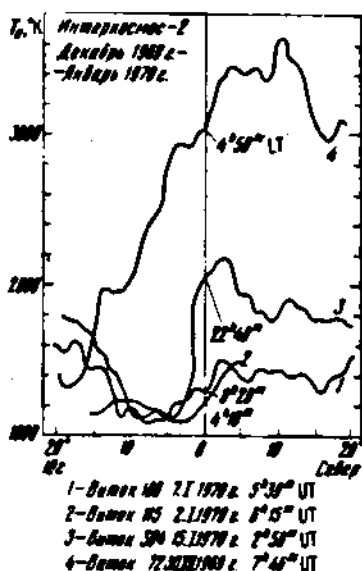
На фиг. 2 показана высотная зависимость электронной температуры в вечернее (19–21 час. LT) и ночное (2–4 час. LT). Относящиеся к этому периоду значения T_e были разделены на группы соответственно потоку солнечного излучения F на частоте 2800 Мгц. В обоих случаях в диапазоне высот 250–500 км наклон кривых составляет $\sim 5^\circ$ К/км, а затем после переходного участка на $h=500\div 600$ км он асимптотически приближается к значению $\sim 3^\circ$ К/км. Здесь также следует отметить вышеупомянутую связь между высотой и местным временем. Максимум на $h \approx 500$ км, вероятно, объясняется этой зависимостью. Из фиг. 2 видно влияние солнечного излучения на высотный профиль T_e ; при низких значениях ($F \approx 125 \cdot 10^{-22}$ эрг·м $^{-2}$ ·гц $^{-1}$) температуры ниже примерно на 300° К. Следует, однако, иметь в виду, что данные для $F < 140$ представляют лишь около 20% всех данных.

Указанные выше характеристики орбиты спутника «Интеркосмос-2» позволили предпринять попытку изучения поведения T_e в экваториальной области. Несмотря на то, что этот анализ еще не завершен, на данном этапе можно сделать некоторые определенные выводы.

Днем над геомагнитным экватором в высотном ходе $T_e(h)$ имеется максимум ($T_e \approx 2500^\circ$ К) на $h=240$ км. На $h > 350$ км T_e не меняется с высотой и в 17–18 час. LT лежит в пределах $1100\div 1300^\circ$ К. В отличие от средних широт нижний предел этого диапазона совпадает с ожидаемой для этого времени, согласно модели Яккия-71, температурой нейтральных частиц T_n . Верхняя граница этой изотермической зоны по данным спутника «Интеркосмос-2» лежит на $h \approx 700$ км. Выше этого уровня T_e монотонно растет с $dT_e/dh \approx 3\div 4^\circ$ К/км.

Ночью вблизи геомагнитного экватора на $h=700\div 1100$ км в 4–5 час. LT при всех пролетах спутника наблюдался минимум $T_e = 1100 \pm \pm 50^\circ$ К, смещенный на $7\div 8^\circ$ к подсолнечной точке. Это значение T_e примерно на 150° К превышало ожидаемую температуру нейтральных частиц, которая в этом случае составила $T_n \approx 950^\circ$ К.

На фиг. 3 показан широтный ход T_e в диапазоне широт $\pm 20^\circ$ от гео-



Фиг. 3

магнитного экватора на $h=1000\div 1100$ км. По оси абсцисс отложена географическая широта с началом отсчета на геомагнитном экваторе, который определялся для каждого прохождения спутника по минимуму напряженности геомагнитного поля, вычисляемого по модели IGRF(10/68) [5]. Вертикальная линия соответствует геомагнитному экватору. Местное время прохождения спутника через геомагнитный экватор отмечено на фиг. 3. Видно, что в темное время суток (22–4 час. LT, кривые 1, 2, 3) минимальные значения $T_e=1100^\circ\text{K}$ не зависят от местного времени (в указанном интервале) и наблюдаются южнее геомагнитного экватора.

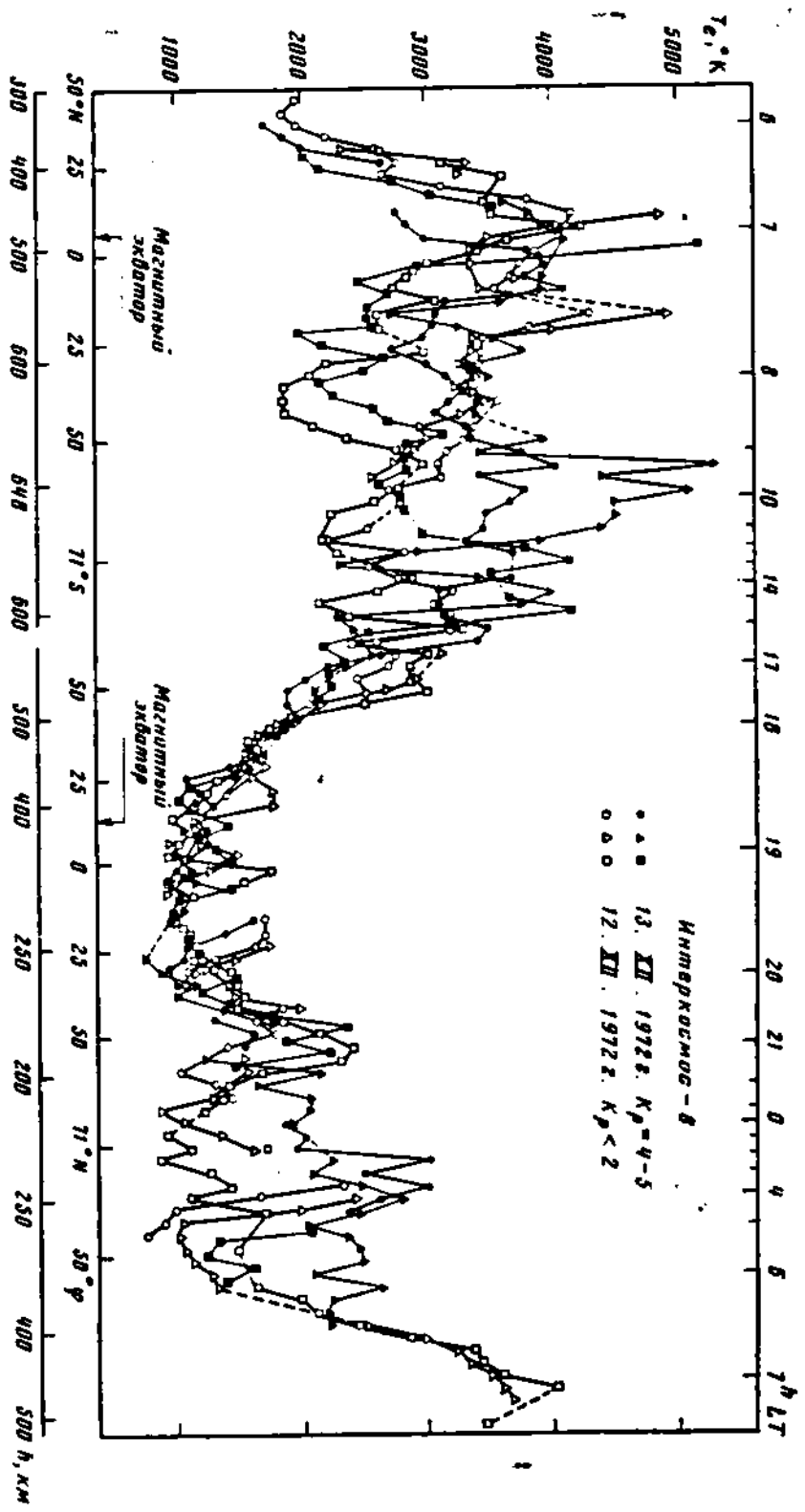
Утром над геомагнитным экватором перед местным восходом Солнца происходит быстрый рост T_e до $3000\text{--}3500^\circ\text{K}$ (кривая 4). Поскольку в это время локальный нагрев УФ-излучением Солнца отсутствует, такой быстрый рост, так же как и на средних широтах, является, по-видимому, предрассветным эффектом. Рассвет в данном случае наступает на одном из концов магнитной силовой линии, проходящей на $h\approx 1000$ км над геомагнитным экватором. Следует отметить, что по мере роста высоты (т. е. параметра L) экваториальная ионосфера связывается магнитными силовыми трубками со все более высокоширотными областями ионосферы. Поэтому следует ожидать, что на достаточно больших высотах поведение T_e над геомагнитным экватором является скорее среднеширотным, чем экваториальным. Специфические экваториальные эффекты в поведении T_e (и, по-видимому, остальных параметров ионосферы) должны наблюдаться на сравнительно малых высотах. Действительно, типично экваториальный эффект — упоминавшаяся выше изотермическая зона — простирается, по данным «Интеркосмоса-2», до $h\approx 700$ км. Магнитную силовую линию, проходящую через верхнюю границу изотермической зоны естественно, по-видимому, считать границей магнитно-экваториальной области ионосферы.

Анализ полученных на спутнике «Интеркосмос-2» данных подтверждает существование над геомагнитным экватором в течение суток (за исключением нескольких часов после восхода Солнца) изотермической зоны, на $h=350\div 700$ км, которая обсуждалась в [6–8]. Как следует из этих работ, в изотермической зоне имеет место тепловое равновесие $T_e=T_i=T_n$. Наши результаты, полученные днем, согласуются с [6–8], однако ночью T_e превышает T_n (определенную по модели Якия-71) на $\sim 150^\circ\text{K}$.

Из результатов измерений электронной температуры следует, что вышеупомянутые закономерности, так же как и ряд других аспектов, связанных с магнитной активностью, глобальным распределением и т. д., должны исследоваться на основе гораздо большего количества данных. Для продолжения этих исследований на спутнике «Интеркосмос-8» был установлен работающий на том же принципе усовершенствованный прибор. Использование современных компонент электроники позволило повысить стабильность технических характеристик прибора. Кроме того, для исключения влияния изменения потенциала корпуса спутника использован дифференциальный способ измерения. Эта цель была достигнута, однако возникли некоторые возмущающие влияния изменяющихся электрических полей на двухэлектродный датчик. Эти поля наводили между электродами напряжение порядка десятков милливольт, что затрудняло обработку данных, а в некоторых случаях приводило к потере информации.

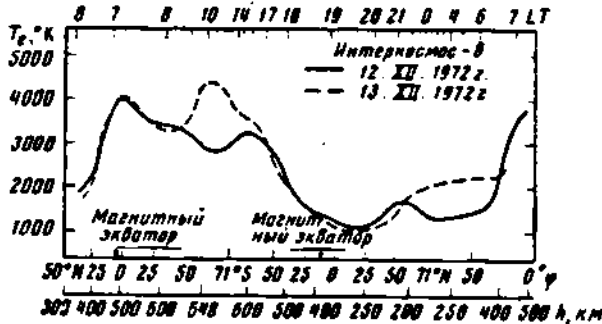
В настоящее время результаты измерений электронной температуры на спутнике «Интеркосмос-8» находятся в состоянии первичной обработки. В качестве примера на фиг. 4 приведены результаты, полученные на шести витках 12 и 13.XII 1972 г., первые три относятся к магнитно-спокойному периоду, а остальные три — к магнитно-возмущенному ($\Sigma K_p=33$).

На всех этих шести витках электронной температура на освещенной части орбиты лежит в интервале $2500\div 4000^\circ\text{K}$, причем над геомагнитным



Фиг. 4

экватором T , имеет максимум $T, \approx 4000^\circ \text{K}$. На ночной части орбиты T , падает до значений $\sim 950^\circ \text{K}$ ($h \approx 300 \text{ км}$). В диапазоне магнитных широт $\pm 55^\circ$ температура имеет более или менее спокойное поведение, в то время как на более высоких широтах наблюдаются значительные флуктуации (например, над Канадой температура изменяется в пределах $1200 \pm 2400^\circ \text{K}$). Другой максимум температуры появляется в субавроральной



Фиг. 5

области южного полушария в течение обоих дней; 13.XII 1972 г. ($K_p \approx 5$) в этой области температура достигала 5300°K по сравнению с 3400°K в предшествующие сутки. Аналогичное поведение T , наблюдается и в субавроральной области северного полушария, где в возмущенный день T , достигает 3000°K . На фиг. 5 показаны дан-

ные фиг. 4, усредненные за магнитно-спокойный день (сплошная линия) и за магнитно-возмущенный (пунктирная линия). Во время возмущений, как следует из сравнения усредненных значений T , повышение T , происходит практически только на высоких широтах, однако следует заметить, что на основе шести витков нельзя сделать определенного вывода. В то же время надо иметь в виду, что измеренные на авроральных широтах высокие значения температуры могут отличаться от реальной термодинамической температуры электронов в ионосферной плазме. В использованном методе измерений предполагается наличие максвелловского распределения электронов по скоростям, а в этих областях фактическое распределение может заметно отличаться от максвелловского [9]. Поэтому полученные в этих областях значения T , являются лишь относительными величинами и должны интерпретироваться совместно с данными по потокам энергичных частиц. Кроме того, следует иметь в виду, что на спутнике «Интеркосмос-2» ВЧ-зонд имел сферическую форму, поэтому полученные с его помощью данные о T , не зависят от ориентации. В 1973 г. были опубликованы результаты измерений при помощи плоских зондов Ленгмюра на спутнике ESRO-1A [10], показавшие, что T , анизотропна (вдоль геомагнитного поля T , выше, чем в перпендикулярной плоскости) и степень анизотропии может достигать фактора 2. Измерения T , сферическим зондом дают некоторое среднее значение между T_{\parallel} и T_{\perp} .

ЛИТЕРАТУРА

1. K. Hirao, K. Otsuka. J. Geomagn. Geoelectr., 1971, 23, 161.
2. К. И. Грингауз и др. Космические исследования, 1973, 11, 85.
3. В. В. Афонин и др. Космические исследования, 1973, 11, 251.
4. L. G. Jacchia. SAO Special Report, No 322, 1971, Cambridge, Massachusetts.
5. J. C. Cain, S. J. Cain. NASA Technical Note D-6237, August 1971. Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Md. 20771.
6. J. P. McClure. J. Geophys. Res., 1969, 74, 279.
7. J. P. McClure. J. Geophys. Res., 1971, 76, 3106.
8. J. P. McClure, В. E. Troy. J. Geophys. Res., 1971, 76, 4534.
9. В. В. Афонин, Г. Л. Гдалевич, С. М. Шеронова. Геомагн. и аэронавиг., 1975, 15, 615.
10. D. H. Clark, W. J. Raitt, A. P. Willmore. J. Atmos. Terr. Phys., 1973, 35, 63.