

ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ АН ССР МОСКВА  
ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ СЛОВАЦКОЙ АКАДЕМИИ НАУК БРАТИСЛАВА

# СБОРНИК

ТРУДОВ МЕЖДУНАРОДНОГО  
СИМПОЗИУМА ПО ФИЗИКЕ  
ИОНОСФЕРЫ И МАГНИТОСФЕРЫ  
ЗЕМЛИ И СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Том 2

РЕДАКТОРЫ

Г.Л. ГДАЛЕВИЧ (ИКИ АН СССР)

С. ПИНТЕР (ГИ САН)

ГУРЬАНОВО, 1977 г.

plasma

Space Sci.

Conf,

1975.

Phys. Res.,

Space ring

1976.

Я. Шмидтауэр , В. В. Афонин

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ  
ТЕМПЕРАТУРЫ В СУБАВТОРАЛЬНЫХ И СРЕДНЕШИРОТНЫХ  
ОБЛАСТЯХ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ НА СПУТНИКЕ  
"ИНТЕРКОСМОС-14"

I. Описание эксперимента.

На борту спутника "Интеркосмос-14" вместе с ОНЧ экспериментом и измерением электронной плотности был установлен так называемый высокочастотный (ВЧ) зонд для измерения электронной температуры. ВЧ зонд является видоизмененным ленгмюровским зондом; на изолированный электрод, который в плазме приобретает плавающий потенциал, накладывается периодически напряжение с частотой около 50 кГц. В силу нелинейности зондовой характеристики в области отталкивающих электроны потенциалов при наложении ВЧ напряжения происходит увеличение постоянного тока и, таким образом, смещение плавающего потенциала в сторону отрицательных напряжений, зависящее от величины кинетической энергии электронного газа, т.е. от электронной температуры. В предыдущих экспериментах применялось ВЧ напряжение постоянной амплитуды и телеметрией передавались скачки плавающего потенциала. Такой подход требует или широкополосный и высокоопросный канал телеметрии для получения достаточно высокой разрешающей способности. Поэтому на спутнике "Интеркосмос-14" применялся другой подход - управление амплитудой ВЧ напряжения: а) в течение 50 мс сравниваются потенциалы рабочего и опорного зондов и их различие запоминается, б) на рабочий зонд накладывается с помощью ключа ВЧ напряжение и через приблизительно 15 мс (время переходного процесса)

петля обратной связи начинает управлять амплитудой ВЧ напряжения таким способом, чтобы приращение различия потенциалов составляло  $\Delta U \approx 0,1 \text{ В}$ , в) телеметрией передается информация о непрерывной амплитуде ВЧ напряжения на входе ключа. В результате всякое передаваемое значение напряжения соответствует определенной электронной температуре и разрешающая способность определяется частотой опросов с пределом  $0,1 + 0,2 \text{ с}$ , который зависит от частоты повторения вышеописанного цикла; в данном приборе эта частота составляла 10 Гц.

Другими преимуществами такого подхода является более удобная зависимость  $T_e$  от напряжения на выходе телеметрии (нелинейность функции  $T_e = f(U_{RF})$  меньше чем у ранее применяемого метода) и практически прямая пропорциональность амплитуды ВЧ напряжения величине  $T_e$ , которая облегчает выполнение условия применимости ВЧ метода для низких температур. Это условие требует, чтобы мгновенное значение потенциала зонда не превышало потенциал плазмы.

Вторая важная черта эксперимента на спутнике "Интеркосмос-14" заключалась в измерении пространственной анизотропии электронной температуры, т.е. различия давлений электронного газа при разных пич-углах. Прибор КМ-4 состоял из двух идентичных систем, каждая из них работала от одного из двух плоских датчиков ДЭТ, расположенных перпендикулярно друг другу. Датчики установлены на одной штанге и нормали их плоскостей направлены вдоль и поперек строительной оси спутника, которая должна была принимать магнитную ориентацию. Таким образом, на борту спутника измерялась в двух перпендикулярных направлениях эффективная кинетическая температура тепловых электронов с максвелловским распределением скоростей. Следует отметить, что из-за неудачной работы системы магнитной ориентации строительная ось не совпадает с направлением геомагнитного поля, иногда спутник даже кувиркается. Но тем не менее можно установить наличие анизотропии, однако в большинстве случаев определить мгновенные направления нормалей зондов и различить продольную и поперечную маг-

нитно  
ми -  
мой  
ту ОН  
связи  
ства  
ных,  
контро  
ческих  
и пере  
чения  
секунд  
переда  
занны  
  
ного д  
ности  
распо  
широта  
той ор  
ник пр  
иногда  
части  
1,3 +  
ной те  
рис. I  
 $T_e$ , из  
ми ДЭ  
и  $T_t$   
ная л  
де от  
счита  
наход  
щая с  
"плаз

НИТНОМУ ПОЛЮ электронную температуру невозможно.

Телеметрическая информация передавалась двумя путями - системой штатной телеметрии и так называемой системой ТС вместе с широкополосным каналом принимаемых на борту ОНЧ излучений в режиме непосредственной передачи. В связи с выходом из строя бортового запоминающего устройства система ТС стала основным средством получения данных, хотя первоначально она считалась только средством контроля работы прибора. Все данные (выходы телеметрических каналов) поступают на мультиплексный переключатель и передаются на поднесущей 22 кГц с ЧМ модуляцией. Значения всех каналов опрашиваются в течение 0,8 с в трехсекундных интервалах, остальное время 2,2 с непрерывно передается ход "продольной" температуры, т.е. выход, связанный с датчиком, смотрящим вдоль оси спутника.

## 2. Первые результаты.

На основе первичной обработки материала, полученного до витка № 1000 представим здесь некоторые особенности имеющихся наблюдений. В связи с географическим расположением приемного пункта системы ТС (Панска Вес, широта  $50,5^\circ$ , восточная долгота  $14,4^\circ$ ,  $L = 2,23$ ), высотой орбиты до 1700 км и наклоном  $74^\circ$  очень часто спутник проходит авроральную область<sup>н</sup> провал в легких ионах; иногда получают данные из полярной шапки и внутренней части плазмосферы, вплоть до нижней границы  $L$  порядка  $1,3 + 1,4$ . Хорошим примером может служить ход электронной температуры на витке 535 за 19 января 1976 г. на рис. I. В верхней части этого рисунка приведены значения  $T_e$ , измеренные двумя взаимно-перпендикулярными датчиками ДЭТ:  $T_z$  - вдоль оси ориентирования (сплошная линия) и  $T_x$  - в перпендикулярном к ней направлении (пунктирная линия). Ниже показаны анизотропия температуры в виде отношения  $T_z/T_x$  (этот канал прибора КМ-4 был рассчитан на величины анизотропии  $\pm 20\%$ , поэтому он часто находится в "зашкале") и величина  $U_{FP}$ , характеризующая с точностью до знака и величины так называемого "плавающего потенциала" (порядка  $-0,5$  В) потенциал кор-

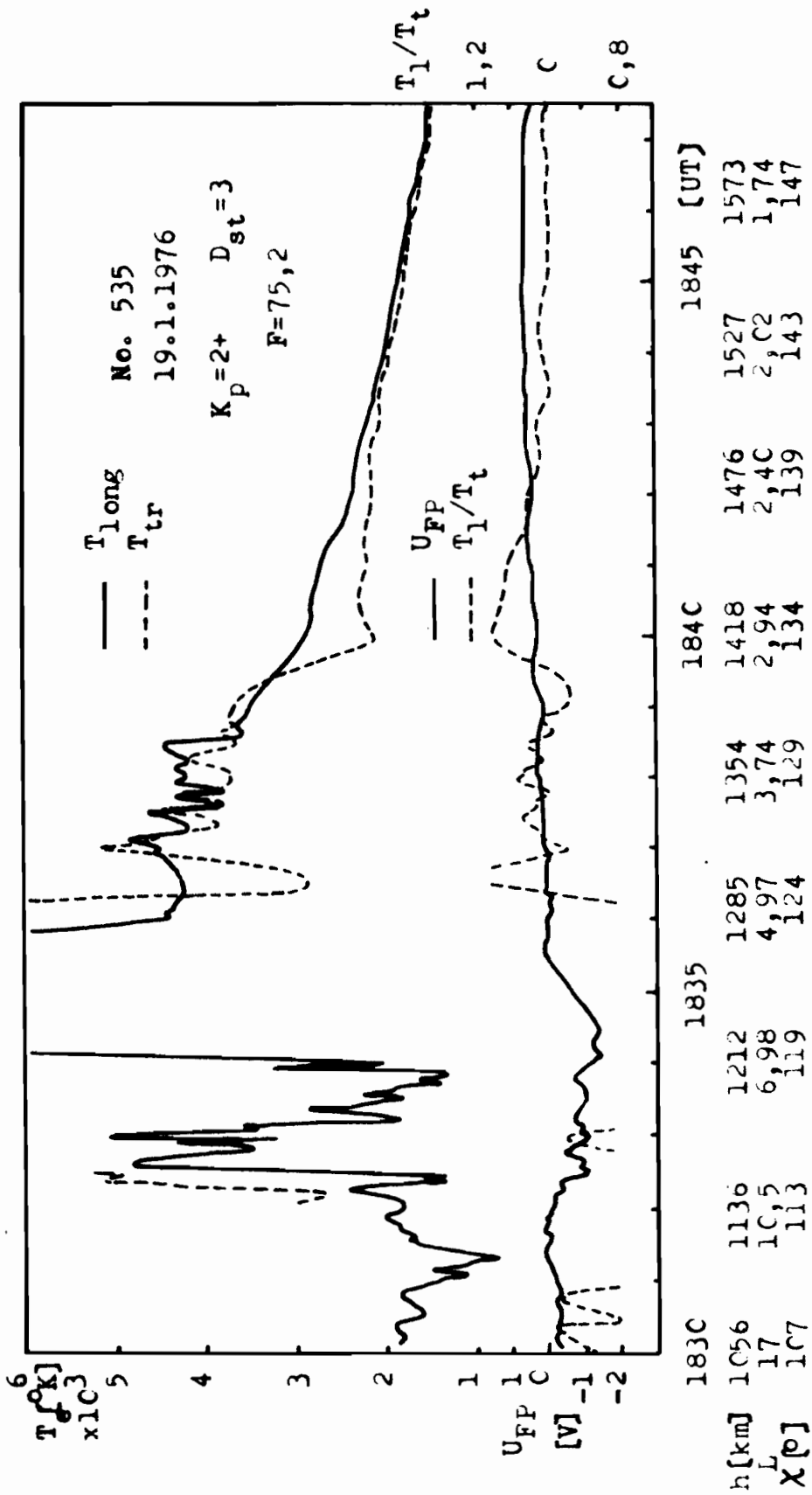


Рис.1. Ход электронной температуры на 535-ом витке, Интеркосмос 14. Внизу показаны высота, L - параметр и зенитный угол Солнца.

нитному полю электронную температуру невозможно.

Телеметрическая информация передавалась двумя путями - системой штатной телеметрии и так называемой системой ТС вместе с широкополосным каналом принимаемых на борту ОНЧ излучений в режиме непосредственной передачи. В связи с выходом из строя бортового запоминающего устройства система ТС стала основным средством получения данных, хотя первоначально она считалась только средством контроля работы прибора. Все данные (выходы телеметрических каналов) поступают на мультиплексный переключатель и передаются на поднесущей 22 кГц с ЧМ модуляцией. Значения всех каналов опрашиваются в течение 0,8 с в трехсекундных интервалах, остальное время 2,2 с непрерывно передается ход "продольной" температуры, т.е. выход, связанный с датчиком, смотрящим вдоль оси спутника.

## 2. Первые результаты.

На основе первичной обработки материала, полученного до витка № 1000 представим здесь некоторые особенности имеющихся наблюдений. В связи с географическим расположением приемного пункта системы ТС (Панска Вес, широта  $50,5^\circ$ , восточная долгота  $14,4^\circ$ ,  $L=2,23$ ), высотой орбиты до 1700 км и наклоном  $74^\circ$  очень часто спутник проходит авроральную область провал в легких ионах; иногда получают данные из полярной шапки и внутренней части плазмосферы, вплоть до нижней границы  $L$  порядка  $1,3 + 1,4$ . Хорошим примером может служить ход электронной температуры на витке 535 за 19 января 1976 г. на рис.1. В верхней части этого рисунка приведены значения  $T_e$ , измеренные двумя взаимно-перпендикулярными датчиками ДЭТ:  $T_{\parallel}$  - вдоль оси ориентирования (сплошная линия) и  $T_{\perp}$  - в перпендикулярном к ней направлении (пунктирная линия). Ниже показаны анизотропия температуры в виде отношения  $T_{\parallel}/T_{\perp}$  (этот канал прибора КМ-4 был рассчитан на величины анизотропии  $\pm 20\%$ , поэтому он часто находится в "зашкале") и величина  $U_{FP}$ , характеризующая с точностью до знака и величины так называемого "плавающего потенциала" (порядка  $-0,5$  В) потенциал кор-

пуска спутника относительно плазмы. Вначале спутник проходит полярную шапку (18:30:00 - 18:32:00UT), характеризующуюся быстрыми вариациями  $T_e$  и сильной анизотропией - в большей части шапки величина анизотропии превышает 20%; далее спутник входит в область аврорального овала, в котором почти всегда на высотах выше 500-700 км обе температуры в шапке ( $T_e > 6000^\circ\text{K}$ ), особенно на приэкваториальном краю овала. Приблизительно в 18:36:00 спутник находится в области приэкваториального склона провала в легких ионах (высота порядка 1300 км), где температура быстро падает, анизотропия достигает значительных величин. В этом районе очень часто начинают наблюдаться свисты канализированного типа, показывающие присутствие замкнутых силовых линий. По этой причине типичное падение температуры можно связать с проекцией плазмопаузы. Начиная 18:37:00 по 18:38:30 появляется субавроральное повышение  $T_e$ , в этом случае относительно небольшой величины (высота  $\sim 1350$  км, вечерний сектор), что можно объяснить величиной  $D_{st} = 3\gamma$ , т.е. низкой интенсивностью кольцевого тока. Ширина зоны субаврорального повышения составляет  $\sim 4^\circ$  по инвариантной широте; здесь интересно отметить тонкую структуру электронной температуры. Далее уже продолжается плавное понижение ночной температуры электронов по мере проникновения в плазмосферу (в конце сеанса зенитный угол Солнца  $\chi = 150^\circ$ ,  $L = 1,6$ ), с единственным небольшим повышением анизотропии на инвариантных широтах  $55^\circ - 48^\circ$ .

Вышеописанный пример хода  $T_e$  является регулярным, присутствие того или другого явления зависит от положения проекции орбиты и геофизической обстановки. Но на фоне такого регулярного хода обнаруживаются иногда явления нерегулярные, а именно изолированные мелкомасштабные неоднородности и среднеширотные  $L = 1,4 + 2,7$  повышения  $T_e$  с четко выраженной анизотропией. Два типичных примера приведены на рис.2, на витках 685 и 738. Пространственно изолированные неоднородности находятся всегда вблизи больших градиентов  $T_e$  (для витков, показанных на рис.2, связаны со среднеширотными повышения-

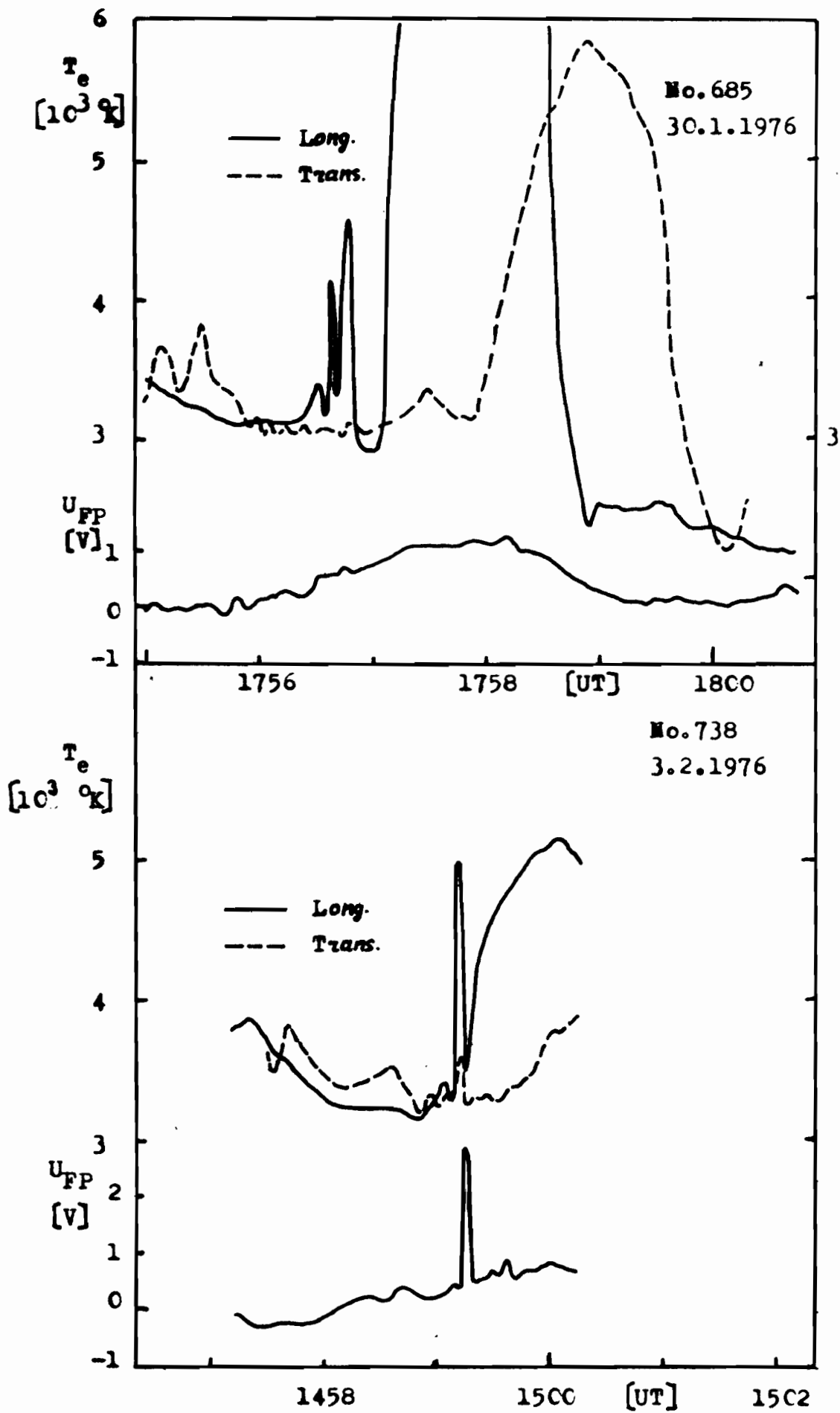


Рис.2. Повышения анизотропии  $T_e$  и присоединенные неоднородности  $T_e$ .



ми). Длительность эффекта составляет до 10-20 с, что соответствует размерам десятков км. Необходимо отметить, что в обоих случаях неоднородности сопровождаются заметной анизотропией. На витке 738 проявляется, кроме того, кратковременное смещение плавающего потенциала - пик с амплитудой 2,5 В, явно связанный с неоднородностью температуры. Одним из возможных объяснений такого резкого изменения потенциала датчика является поток частиц, падающих на зонд.

### 3. Среднеширотные повышения $T_e$ .

Вторым эффектом, на котором остановимся немного подробнее, являются среднеширотные повышения электронной температуры. Начиная с витка 644 в области средних широт, на L - оболочках I,45 + 2,10 и на высотах 1600 + 1700 км наблюдаются повышения  $T_e$  с довольно сильной анизотропией. Эти повышения наблюдались в группе витков 644-848 (27.1.1976 + 11.2.1976) и после перерыва в работе спутника (11.2 - 24.2.1976) эффект уже не повторялся. Амплитуды повышений достигают  $3000^{\circ}\text{K}$  при исходной температуре в этой области около  $2500^{\circ}\text{K}$ - $3000^{\circ}\text{K}$ . Средняя амплитуда с временем падает, вначале (витки 650-700) достигает  $2800^{\circ}\text{K}$ , к концу периода наблюдений (витки 800-850) около  $1500^{\circ}\text{K}$ ; при этом существует сильный разброс амплитуд, который можно, по-видимому, объяснить анизотропией и нерегулярным характером вращения спутника.

Все наблюдения повышений относятся к вечернему сектору, среднее солнечное время меняется от  $19^{\text{h}} 50^{\text{m}}$  до  $17^{\text{h}} 30^{\text{m}}$ . На рис.3 показано пространственное распределение среднеширотных повышений в географических координатах, приблизительно показаны сечения - оболочек для высоты 1600 км. Пунктир на линиях обозначает область повышения в "продольной" температуре, но это обозначение является условным в связи с неопределенностью магнитной ориентации. Из рис.3 хорошо видно, что эффект в основном относится к L - оболочкам I,6 + I,9; в районе видимости наземной станции (долготы  $5^{\circ}\text{E}$  -  $60^{\circ}\text{E}$ ) от долготы не зависит. Из этого вытекает или долготная протяженность эф-

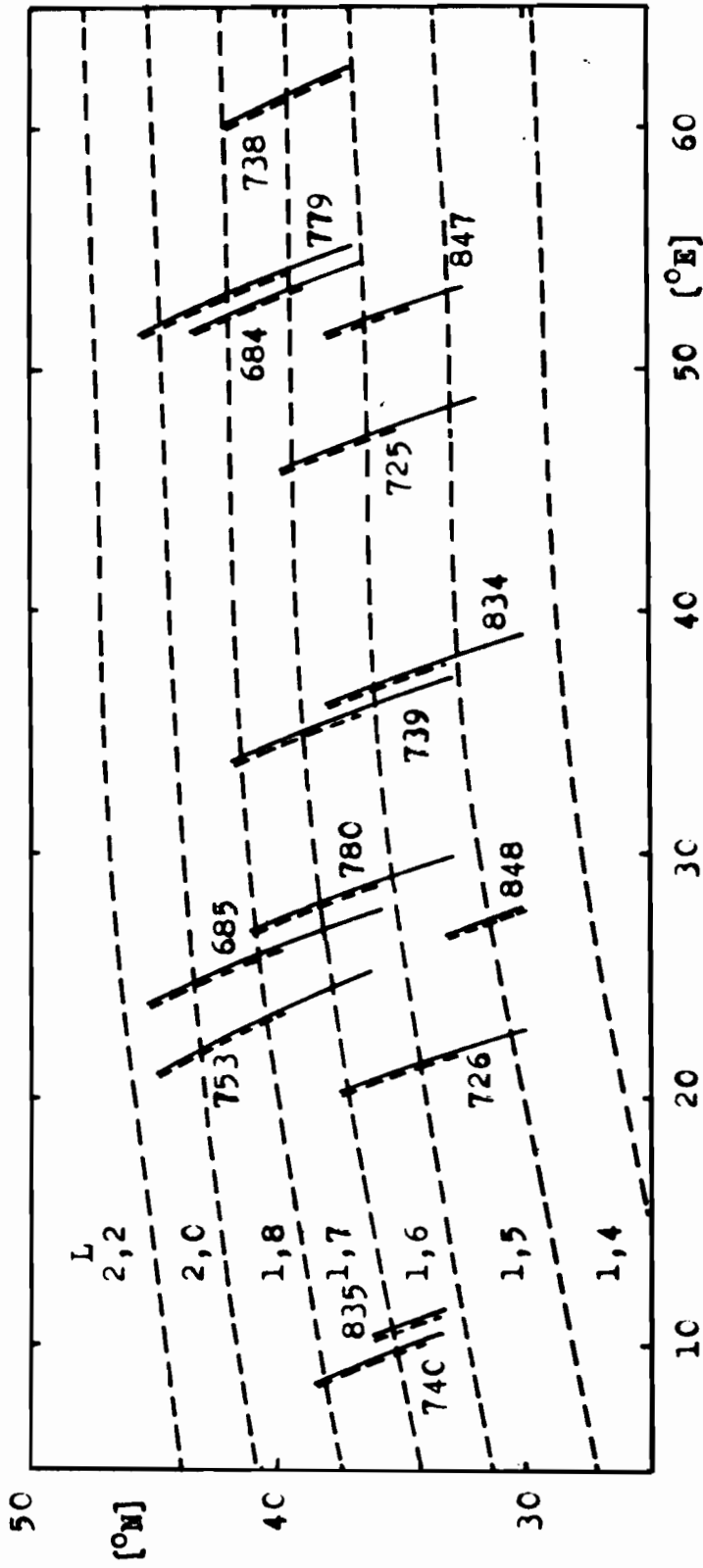


Рис.3. Географическое распределение наблюдений повышенной анизотропии электронной температуры на спутнике "Интеркосмос 14". Приведены номера витков.

факта, или его зависимость только от местного времени.

#### 4. Дискуссия

Во-первых, необходимо привести данные, опубликованные до сих пор в литературе по среднеширотным повышениям анизотропии температур. На спутнике ЭСРО-1А [1] измерения велись при помощи двух плоских зондов, однако используемый метод не позволял получить сравнительную разрешательную способность (период измерений составлял 12,8 с). Измерения часто показывали наличие повышений анизотропии около  $L = 1,5$  с максимумом в  $00^h$  на высотах порядка 1000 км. Другой эксперимент, подтверждающий появление время от времени таких повышений анизотропии, осуществлялся на спутнике "Эксплорер-31", где анизотропия электронной температуры наблюдалась благодаря быстрому вращению спутника. Дальнейшие работы по новому среднеширотным повышениям анизотропии  $T_e$  по нашим сведениям не появились.

Таким образом, повышения электронной температуры и ее анизотропии на средних широтах наблюдаются нерегулярно, но относительно часто. На основе наших измерений можно предполагать, что их присутствие связано скорее с геофизической обстановкой, чем с местным временем. Хотя на основе предполагаемого максимума около полуночи [1] хотелось бы связать падение амплитуды при переходе от 2000 к 1700 LT именно с удалением времени наблюдений от полуночи, необходимо учесть, что до витка 644 повышения анизотропии не наблюдались. При этом местное время было ближе полуночи, высота и широта отличаются мало. Различие геофизической обстановки по индексам  $K_p$  и  $D_{st}$  не явное, источник повышений в этих параметрах, по-видимому, не отражен. Длительность периода наблюдений порядка четырнадцать дней.

Весьма важной чертой повышений  $T_e$  является анизотропия с характерным чередованием повышений в "продольной" и "поперечной" температурах со смещением их максимумов на приблизительно одну минуту. Такую картину можно объяснить двумя путями: а) существует область анизотроп-

ных температур с осью максимальной температуры в одном направлении и чередование максимумов в двух перпендикулярных системах обусловлено вращением спутника, б) существуют области с анизотропией типа  $T_{\perp} > T_{\parallel}$  и  $T_{\perp} < T_{\parallel}$  и чередование максимумов отражает пространственное расположение таких областей. По первым оценкам кажется более вероятной возможность б), однако возможность а) требует тщательного рассмотрения динамического поведения ориентации спутника в области апогея.

Несмотря на такую неопределенность, можно только на основе самого факта анизотропии  $T_e$  сделать определенные выводы. Область сильной анизотропии  $T_e$  является нестабильным состоянием плазмы. Анизотропию давления можно выразить максвелловским распределением

$$f_0 = - \frac{N}{(2\pi m_e)^{3/2} T_{\perp} \sqrt{T_{\parallel}}} e^{-\frac{m_e v_{\perp}^2}{2T_{\perp}} - \frac{m_e v_{\parallel}^2}{2T_{\parallel}}}$$

Такое распределение неустойчиво, оно со скоростью переходит (без притока энергии) в равновесное распределение; для значений  $N \approx 3 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ ,  $T_e \approx 5 \cdot 10^{30} \text{ К}$  получаем при величине  $\lg \lambda = 16,5$ :

$$\tau_e = \nu_e^{-1} \approx \frac{5}{8} \frac{m_e^{1/2} (kT_e)^{3/2}}{\sqrt{\pi} N e^4 \lg \lambda} \approx 7,4 \cdot 10^{-2} \text{ с}$$

Для удержания анизотропии температур с различием  $\Delta T \sim 10^{30} \text{ К}$  требуется приток энергии порядка  $N k \Delta T \sim 3,5 \cdot 10^3 \text{ эВ. см}^{-3}$ . Анизотропия температуры определяет изменение знака у антиэрмитовских частей тензора диэлектрической проницаемости и вызывает таким образом усиление волн, т.е. неустойчивость плазмы к электромагнитным волнам. Согласно [3] в такой среде могут усиливаться спиральные волны, причем инкремент нарастания имеет максимум на частоте

$$\omega = \omega_{se} \left(1 - \frac{T_{e\parallel}}{T_{e\perp}}\right)$$

На высотах 1600 км и для  $L \approx 1,6$  напряженность магнитного поля  $\sim 17,5 \text{ А/м}$ , т.е.  $f_{se} \sim 600 \text{ кГц}$ . Таким образом получается, что неустойчивость проявляется больше всего на частотах десятков кГц до сотен (100-150) кГц.

Последним из вопросов является вероятный механизм поддержания анизотропного давления электронного газа и самого повышения температуры. Перечень некоторых возможных механизмов приведен в [1], причем здесь отсутствует один механизм, который по нашему мнению претендует на самый вероятный - нагрев электронов волнами, возникающими в районе экватора. По измерениям внутри плазмосферы [4] (прохождения экваториальной зоны до нижнего предела  $L \sim 2,0$ ) наблюдались периодически, с временем существования десятков дней, электромагнитные волны в диапазоне десятков - сотен Гц, причем можно предполагать их существование и на более низких  $L$ . Такие волны в принципе способны передавать электронам с разнымиpitch-углами разную энергию, но к сожалению, относительно их возможного источника существуют скудные данные - имеется очень мало сведений о распределении низкоэнергичных частиц во внутренних поясах радиации. По поводу источника волн, наблюдаемых согласно [4] и по анизотропной передаче энергии волн электронам и связанным вопросам еще требуется проведение многих теоретических и экспериментальных исследований.

Перечисленные выше результаты являются только предварительными, обработка материала не закончена. По этой причине можно предположить некоторые уточнения приведенных данных. В дальнейшем необходимо в основном обсудить механизмы возможного возникновения анизотропии электронной температуры и следствия существования таких явлений.

#### Литература

1. D.H.Clark, W.J.Raitt, A.P.Willmore, J.Atm.Terr.Phys., 35 (1973), 63.
2. J.L.Donley, L.H.Brace, J.A.Findlay, J.H.Hoffman, G.L.Wrenn. Proc.Inst.El.Electron,Engng, 57 (1969), 1078.
3. В.Д.Гинзбург, А.А.Рухадзе. Волны в магнитоактивной плазме. Москва, 1975.
4. D.A.Gurnett. J.Geophys.Res.,81 (1976), 2765.