

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.

В.В.Афонин, Я.Шмидлауэр

СУБАВРОРАЛЬНЫЕ ПОВЫШЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

I. Введение.

Целый ряд работ, появившихся в последние годы, посвящен изучению связей повышения интенсивности кольцевого тока во время суббурь и повышения электронной температуры в ионосфере, иногда до величин, позволяющих возбуждение атомов кислорода и их свечение OI (1D 2^3P_2) на длине волны 6300 Å. Началом этих работ явилось установление корреляции стабильных авроральных красных дуг (SAR-arcs) и понижения D_{st} [1,2], связи положения красных дуг и плазмосаузы [3] и понижения концентрации H^+ в районе красных дуг [4]. Корнуэлл и др. [5] и другие авторы [6,7] предложили более вероятный механизм передачи энергии от протонов с энергиями порядка десятков кэВ к электронам ионосферной плазмы: конно-циклотронные волны, усиливаемые взаимодействием с протонами кольцевого тока, распространяются вдоль силовых линий в сторону ионосферы и посредством затухания Ландау передают свою энергию к окружающим электронам, которые, в свою очередь, передают энергию на ионосферные уровни. Детали этого процесса и относительная роль различных механизмов переноса энергии на ионосферные высоты (конвекция, теплопроводность, перенос непосредственно волнами) не совсем ясны. Однако до сих пор волны предполагаемых частот не наблюдались.

Эта работа является вкладом в изучение широкого диапазона вопросов, связанных с вышеуказанными эффектами. На основе измерений на спутниках "Космос-378" и "Интеркосмос-8" показывается, что повышения электронной температуры (T_e) в субавроральной зоне имеют место не

только в возмущенных, но и в спокойных условиях, хотя величины повышения недостаточны к возбуждению детектируемого излучения кислорода. Морфология этих повышений указывает одинаковую природу с красными дугами, но в этом случае вопрос о механизме притока энергии встает более остро.

2. Экспериментальные данные

На спутниках "Космос-378" и "Интеркосмос-8" проводились измерения электронной температуры методом высокочастотного зонда [8,9]. Несмотря на разные формы датчиков (сферический и плоский) и особенности отдельных аппаратур, точность измерений и разрешение по времени (порядка нескольких секунд) сравнимы. Обработка данных и вычисление температуры электронов конусообразной плазмы проводилось в предположении максвелловского распределения скоростей. Закон распределения может нарушаться в областях с пониженным значением частоты соударений электронов или в потоках энергичных частиц (энергии порядка эВ). На основе проведенного анализа можно предполагать, что на имеющихся высотах и в субавроральных областях существуют некоторые отклонения в сторону больших температур, но ими не искажается общая картина изучаемого эффекта.

Спутник "Космос-378" был запущен на орбиту с наклоном 74° и высотами перигея и апогея 240 и 1750 км соответственно. Полученные данные относятся к зимнему периоду 1970-1971 гг. Спутник "Интеркосмос-8" работал на два года позже (декабрь 1972 - январь 1973 гг.), наклоне орбиты 71° , высоты перигея и апогея 210 и 670 км. Для поведения электронной температуры в субавроральных областях, согласно нашим измерениям, характерно четко выраженное повышение в узком интервале инвариантных широт (порядка $3-8^\circ$), причем величина повышения достигает иногда $2000-3000^\circ\text{K}$. По этим характеристикам субавроральные повышения T_e скорее являются "всплесками T_e ". Такая картина отличается от ранее описанных плавных и

широких
ния T_e ,
но они с
лично от
на спутн
в основ

И
"Космос-
а на сп
брани т
стие э
(250-16
верного
субавре
1972 г.
вариант
ответс
ка, вы
L=4,6
риода
ков T_e
ние D
интлого
следует
ств -
 T_e с
спокой
повише
магнит
D_{st} = -5
но ин

T_e был
в коор
ебок
загр
фельд

широких максимумов на магнитных широтах $50-60^\circ$. Повишения T_e подобного характера описаны в работах [10,11], но они относятся к магнитно-возмущенным периодам. В отличие от этих экспериментов, повишения T_e , наблюдаемые на спутниках "Космос-378" и "Интеркосмос-8", относятся, в основном, к магнито-спокойным условиям.

Примеры возрастаний T_e , полученных на спутнике "Космос-378" зимой 1970-71 гг., приведены на рис.1, а на спутнике "Интеркосмос-8" - на рис.2. Примеры выбраны таким образом, чтобы продемонстрировать присутствие этих повишений во всем диапазоне высот спутников (250-1600 км, 230-600 км); большинство примеров из северного полушария. На рис.3 показано семь переходов субавроральной зоны спутником "Интеркосмос-8" зимой 1972 г. Итриковые линии соединяют моменты переходов инвариантных широт $\Lambda=63^\circ, 60^\circ, 55^\circ$ ($L=5, 4$ и 3 , соответственно). На каждой графике приведены номер витка, высота и местное время прохождения оболочки

$L=4,0$. В правой части рис.3 для рассматриваемого периода приведены значения K_p , положение центра всплесков T_e (светлые кружки) в L -координатах и экваториальное D_{St} - вариации горизонтальной компоненты геомагнитного поля. Широтное положение возрастаний T_e , как следует из рис.3, коррелирует с геомагнитной активностью - с увеличением K_p и понижением D_{St} - возрастания T_e смещаются к экватору. В конце длительного магнито-спокойного периода 11 декабря 1972 г. (соединение III-172) повишение T_e располагалось на $L=5,6$. В максимуме геомагнитной бури 15-16 декабря 1972 г. ($K_p=7$, $\sum K_p=28$, $D_{St}=-53\gamma$) рост T_e сместился на $L=2,8$, т.е. на 12° по инвариантной широте к экватору.

Для обобщения морфологии наблюдаемых повишений T_e были построены карты распределения их максимумов в координатах местное время-инвариантная широта для обоих спутников (рис.4 и рис.5). На этих рисунках заштрихованные области - овал полярных сияний по фальдтейду. В нижней части рисунков приведены гисто-

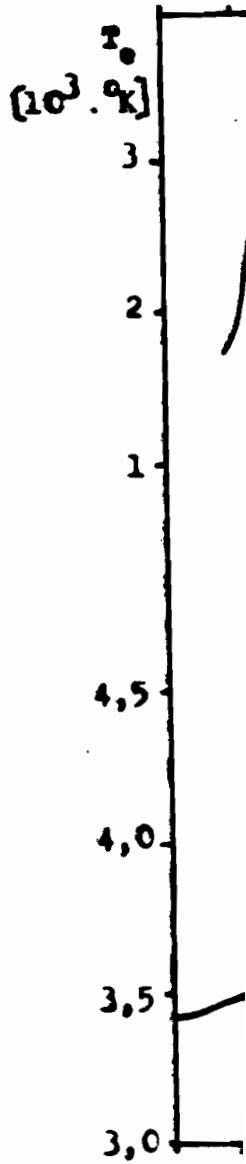
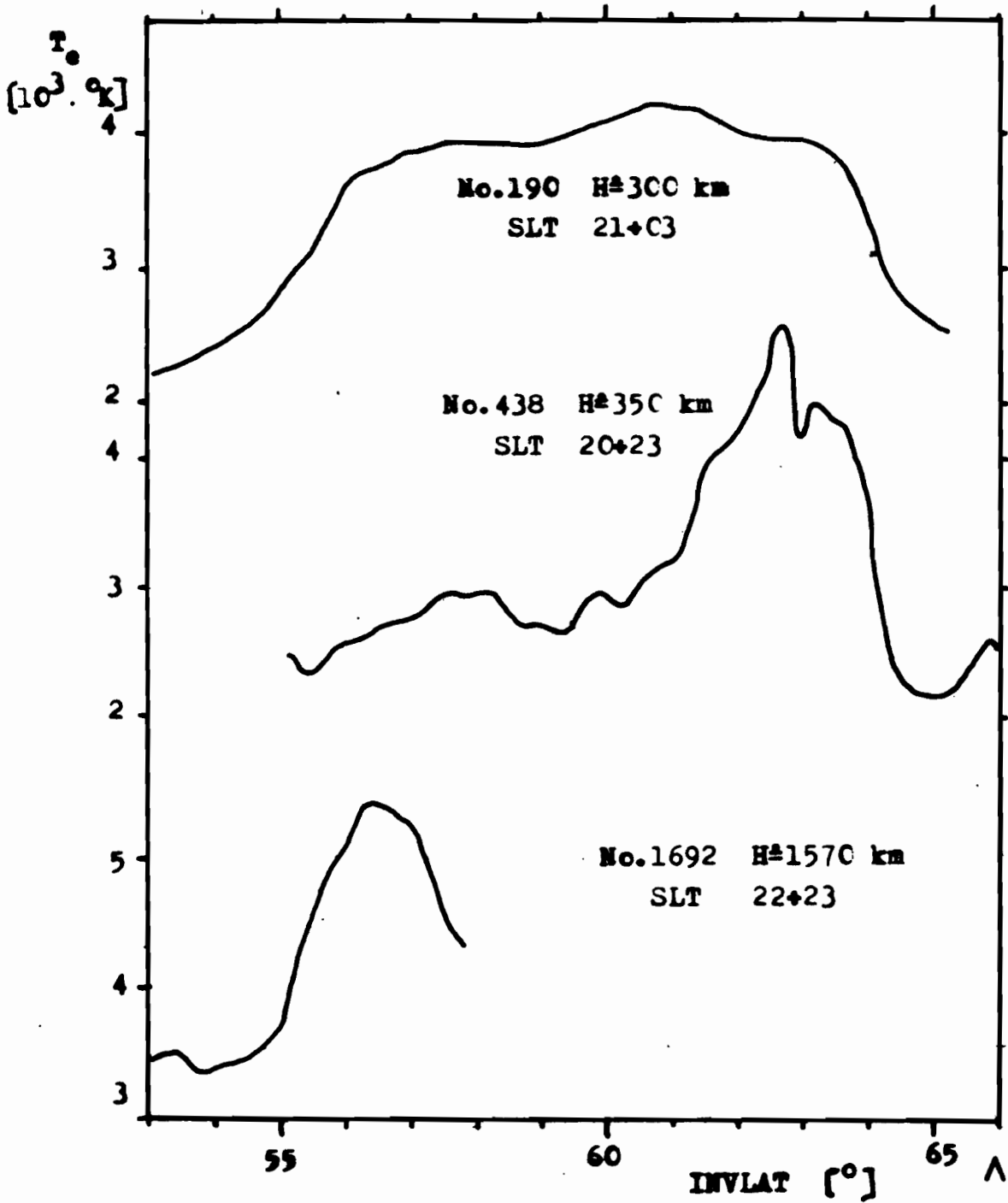


Fig. 2.

Fig. 1. Position of T_e , Cosmos 376, 1.12.1970, 19.12.1970, 19.3.1971.

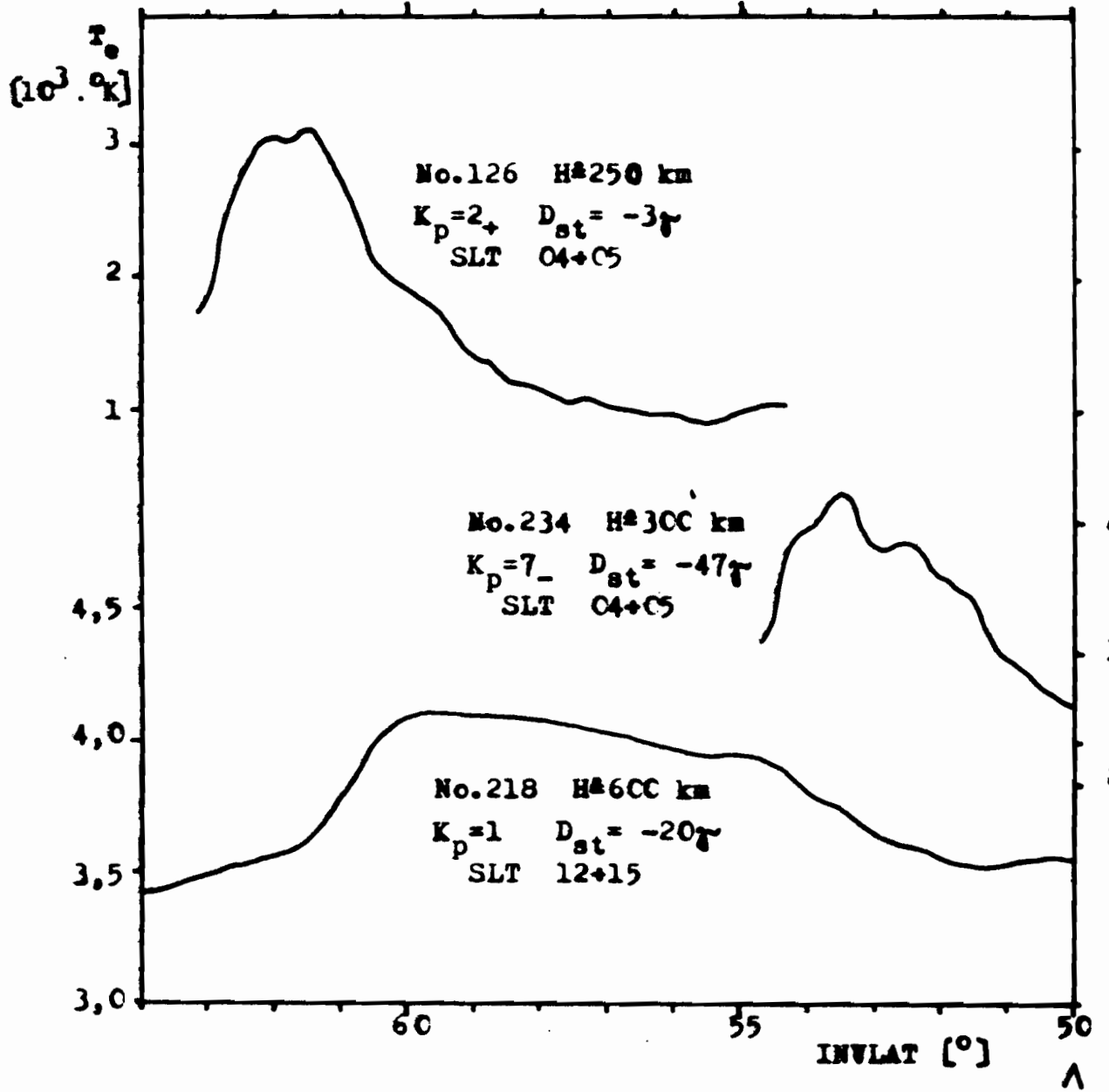


Рис. 2. Повышения T_e , Интенсивнос 8, 8.12.1972, 15.12.1972, 14.12.1972.

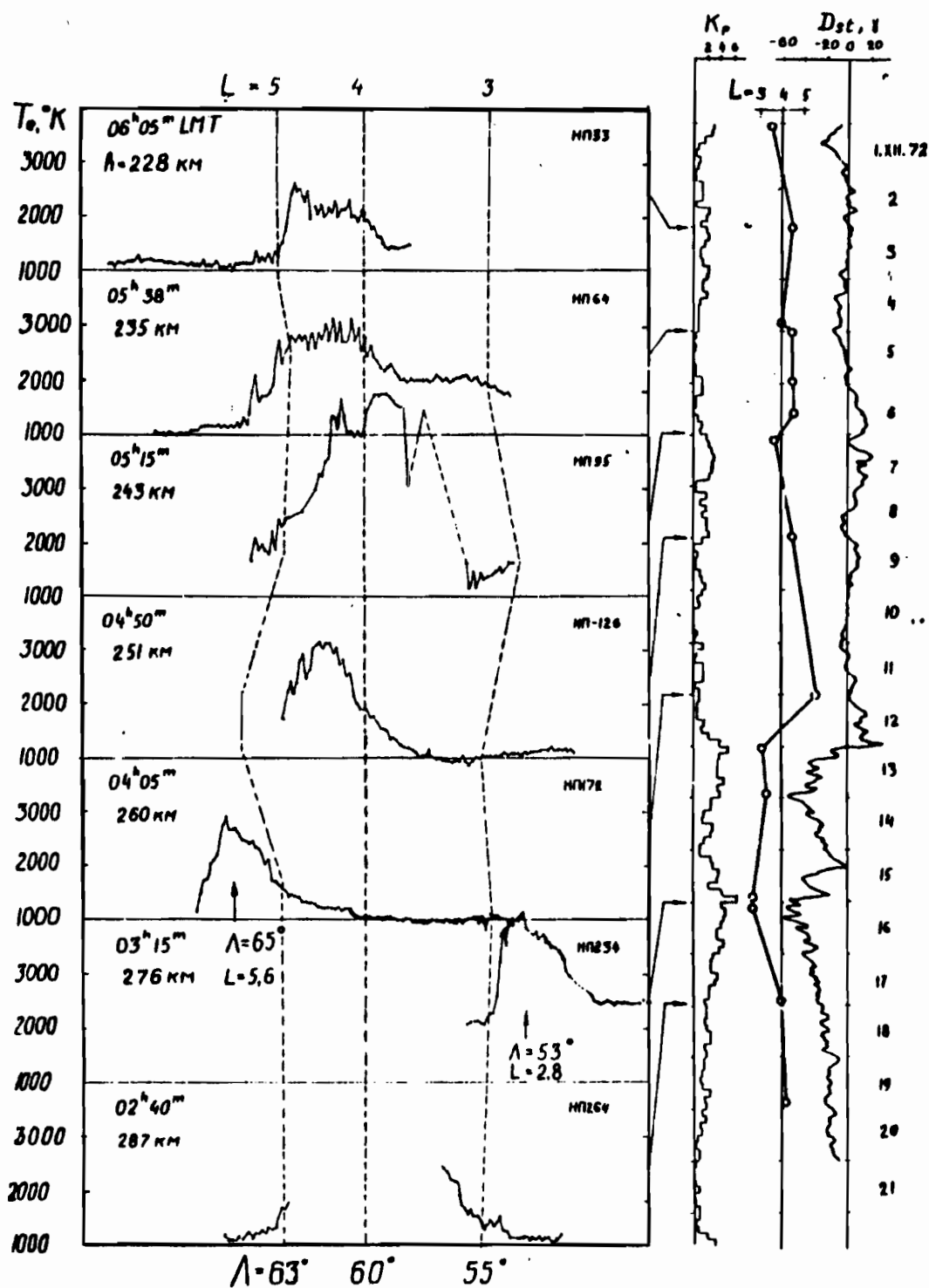


Рис.3. Поведение субавроральных возрастаний T_e в декабре 1970г. _____ о _____ - Δ - параметр центра повышения T_e .

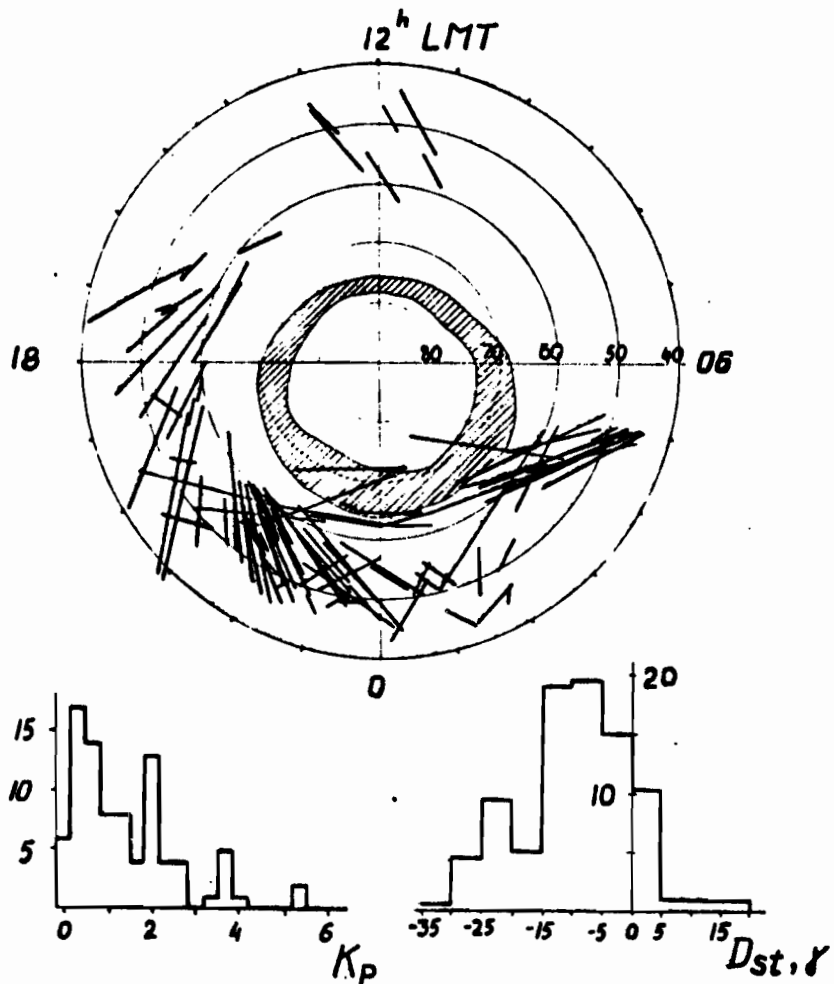
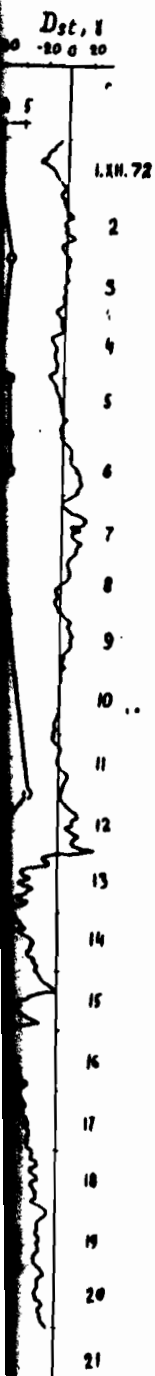


Рис.4. Участки траекторий спутника "Космос-378", на которых наблюдалось повышение T_e (зима 1970-71 гг.) и гистограммы распределения по K_p и $\Phi_{стэкв}$.

кабре
по-

ИНТЕРКОСМОС-14

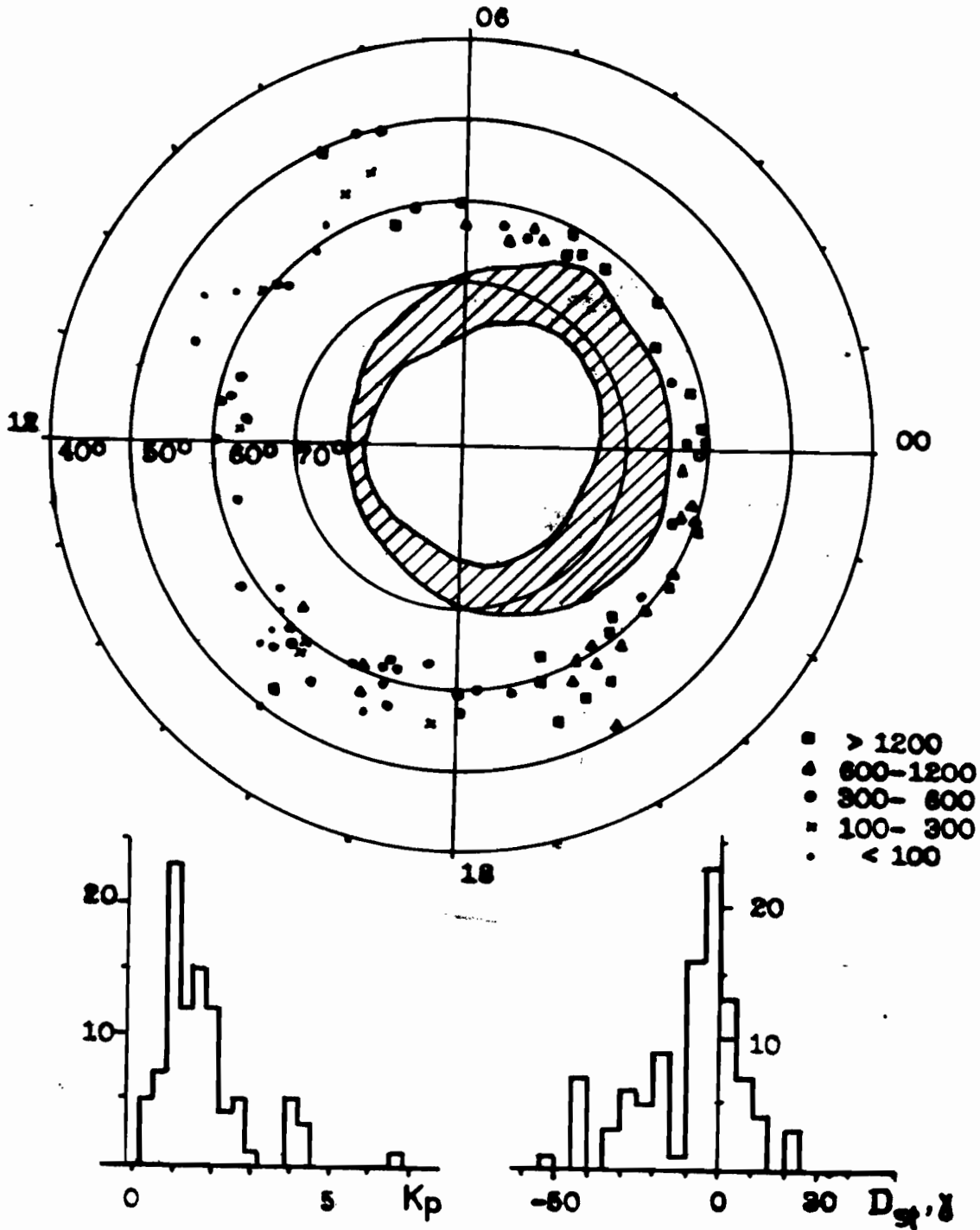


Рис.5. Распределение центров возмущений T_c в координатах солнечное время - магнитная широта

197
за
НИИ
ПОС
АМИ
и Д
РИА
РАС
ПАЗ
КВМ
ДЕС
ВЕН
НОЧ
НИХ
ВНОС
или
АМИ
ПОВ
ЯВНО
СИТ
НИИ
в 75
ной
для

граммы распределений числа случаев наблюдения возрастаний T_e по уровню планетарной геомагнитной активности K_p и интенсивности кольцевого тока, представленного параметром D_{stack} . Как видно из этих гистограмм, большинство случаев появления возрастания T_e приходится на магнито-спокойные периоды ($K_p \leq 3$). Соответственно, максимум числа повышений приходится на периоды нормальной или слабо повышенной интенсивности кольцевого тока.

На основе имеющегося материала из зимних периодов 1970-1971 гг. и 1972-1973 гг. можно сделать следующие заключения:

1. В субавроральных зонах в диапазоне инвариантных широт $50^\circ-64^\circ$ (L - параметр 2,5-5,3) очень часто появляются повышения T_e типа всплесков, относительная амплитуда которых составляет сотни $^\circ K$ в дневное время и достигает амплитуд $2000-3000^\circ K$ в ночном секторе. Ширина этих повышений составляет несколько градусов, порядка $3^\circ-8^\circ$. Хотя материал перекрывает почти весь диапазон по местному времени, из-за ограниченного числа измерений в отдельных секторах невозможно сделать определенные заключения относительно асимметрии зоны повышений T_e . Можно только отметить пониженный разброс в ночном секторе, который увеличивается днем и наибольших значений достигает в вечернем секторе.

2. Повышения T_e наблюдаются во всем диапазоне высот орбиты спутников, т.е. с высот от 250 до 600 км или 1600 км. В общем нет четко выраженной зависимости амплитуды всплеска от высоты, проявляется тенденция к повышению амплитуды с высотой.

3. Одной из важных характеристик повышений T_e является их постоянство во времени, несмотря на относительно магнито-спокойный характер периодов наблюдений. Эффект повышения можно установить приблизительно в 75-80% активных проходов спутника субавроральной зоной.

3. Дискуссия

Как уже отмечалось, похожие повышения описаны для отдельных случаев по измерениям ESRO-I, ISIS-I

00

200
-1200
- 600
- 300
100

рдннктах

и 2, но всегда в связи с магнитными возмущениями, или даже с появлением красных дуг. Причиной того, что нами наблюдаемые повышения не отмечались ранее, может быть повышенная разрешающая способность высокочастотного зонда, который в пределе позволяет почти непрерывное измерение T_e .

Первым вопросом для рассмотрения является положение повышения относительно провала в легких конях. Из ряда витков, на которых получена одновременная информация по T_e и плотности электронов (высоты примерно 300 км, ночное время) можно установить, что повышения появляются внутри провала, чаще всего на экваторальном склоне провала. Более определенные заключения можно получить по измерениям, проводимым на борту скутника "Интеркосмос-14", где одновременно производились измерения T_e и прием ОНЧ излучений. Повышения T_e здесь появляются внутри зоны приема канализированных свистов, хотя близко к их полярной границе [12]. На основе этих наблюдений можно утверждать, что повышения T_e имеют место внутри области замкнутых силовых линий.

Вышеперечисленные результаты показывают, что субавроральные повышения имеют похожую пространственную морфологию, как стабильные красные дуги. По этой причине можно предполагать, что и механизмы их возникновения похожи. Подтвердив результаты работ последних лет [5,6,7,13], можно первоначальной причиной появления красных дуг считать протонный кольцевой ток. В течение суббури вместе с сжатием плазмосферы на ночной стороне происходит инжекция частиц из плазменного слоя (в основном протонов) до пределов границы слатой плазмосферы. В фазе восстановления в области кольцевого тока начинает повышаться плотность холодной плазмы и возникает неинтегрированная неустойчивость. Взаимодействие волн с энергичными частицами начинается с высших энергий и вне экватора усиленные волны способствуют с одной стороны повышению анизотропии итс-распределению для низких энергий, что важно для фер-

сировани
странито
посредот
этого ос
нагрев к
нами; пр
ния Ланд
ос
применен
наблден
на котор
во-втор
рос боле
ний волн
дуг. В э
боти. Га
от конис
ний чем
уз [15]
"горячей
I-10 эВ
именно
ниями "Д
в том ч
С
гип кони
тонов я
с ним го
плазмос
ствие ос
лось ум
повыше
можно п
горячей
и динам
граница
стигайт

сирования эффекта [7], с другой стороны, волны распространяются вдоль силовых линий до конусоферных высот, где посредством затухания Ландау нагревают электроны. Кроме этого основного механизма предполагается первоначальный нагрев кулоновскими столкновениями с высыпавшимися протонами; при повышенной T_e повышается эффективность затухания Ландау.

Основными вопросами, которые необходимо решать при применении такого рода механизма для объяснения наших наблюдений, является перенос энергии на низкие высоты, на которых конно-циклотронные волны не распространяются и, во-вторых, постоянный характер повышенной T_e . Первый вопрос более общий, он связан с отсутствием прямых наблюдений волн в диапазоне 0,1-3 Гц даже в присутствии красных дуг. В этом направлении, по нашему мнению, важны две работы. Галеев [14] предложил механизм переноса энергии от конно-циклотронных волн к протонам, более эффективный чем механизм переноса энергии к электронам. Грингауз [15] сообщил результаты наблюдений так называемой "горячей зоны", содержащей протоны с энергиями порядка 1-10 эВ, для которых источником нагрева могут служить именно конно-циклотронные волны. Такие зоны, по измерениям "Прогноза-1", обнаружены при совсем разных условиях, в том числе в магните-спокойных периодах.

Существуют тогда два возможных пути передачи энергии конно-циклотронных волн плазме, причем нагрев протонов является более вероятным механизмом, а связанные с ним горячие зоны, расположенные на внутренней стороне плазмоспаузы, наблюдались экспериментально. Само присутствие областей с температурой ионов 10^4-10^5 К наблюдалось уже раньше [16], но для объяснения субавроральных повышенной важны их морфологические свойства, которые можно перечислить на основе [15]: а) внешняя граница горячей зоны соответствует предположениям о размерах и динамике плазмасферы, б) широтные градиенты T_i на границах горячей зоны большие, в некоторых случаях достигают даже 10^5 К в расстоянии долей L , в) ширина

зон по инвариантной широте составляет 8° в спокойных условиях и сужается до $3^\circ-4^\circ$ в возмущенных условиях.

По-видимому, получается качественное соответствие субавроральных повышений T_e и горячих зон; для количественной оценки их связи, т.е. переноса энергии от протонов к электронам, исходя из потока тепловой энергии электронного газа на уровне приблизительно 500 км, выше которого можно пренебречь (относительно конвекции) локальными стеками и истоками энергии электронов. Этот поток имеет величину порядка $5 \cdot 10^9$ эВ.см $^{-2}$ с $^{-1}$; поток на порядок выше уже обеспечивает свечение кислорода с интенсивностью I кР [5]. Обмен энергии между протонами и электронами описывается уравнением Фоккера-Дланка, в котором не учитываем член трения (пренебрегая различием средних скоростей). Согласно [17] характерное время уравновешивания температур T_i и T_e равно

$$\tau = \frac{m_i (2kT_i)^{3/2}}{m_e^{1/2} 4\pi N e^4 \lg \lambda},$$

где k - постоянная Больцмана, T_i - эффективная температура ионов, N - концентрация ионов и $\lg \lambda$ - куленовский логарифм. Для $T_i = 10^4$ К, $N = 10^3$ см $^{-3}$, $\lg \lambda = 20$ это время приблизительно $2 \cdot 10^4$ сек. При этом заметим, что время установления максвелловского распределения электронов меньше почти на четыре порядка и равно для вышеприведенных величин 5 сек. Интенсивность передачи энергии для $T_i \gg T_e$

$$q = \frac{3}{2} \frac{kT_i}{e} N \frac{1}{\tau} = q_0 \frac{N^2 \lg \lambda}{(kT_i)^{1/2}}$$

т.е. $\sim 8 \cdot 10^{-2}$ эВ.см $^{-3}$ с $^{-1}$. Обмен энергии происходит во всем объеме силовой трубки с высоты h_0 (500 км) до экватора:

$$V = \int_{S_0}^{S_c} S ds = L \frac{(1+4ctg^2\theta_0)^{1/2}}{\sin^4\theta_0} \int_{\theta_0}^{\pi/2} \sin^6\theta d\theta$$

где $\theta_0 = \arcsin((R_E + h)/LR_E)$. Для $L=5$ получаем $\theta_0 = 0,483$ и $V = 1,35 \cdot 10^{11}$ см 3 , тогда $qV \approx 1,1 \cdot 10^{10}$ эВ.см $^{-2}$ с $^{-1}$.

В силу небольших изменений $\lg \lambda$ с изменением N и T_i

можно при
няя энерги
оценки мо

1.
нам может
держания
ральных с

2.
концентр
областях
может по
ных бурь

3.
точки эр
ных эле

4.
производ
частиц.

максвелл
Присутст
метно с

0
овое оч
но на и

причина
максвелл
ной эфф

онно-к
реакции
на два

выше с
жаются
сущест

N_e
ростом
ной р

Этот

можно приблизительно выразить $q \sim N^2 \cdot E^{-1/2}$, где E - средняя энергия ионов. На основе приведенных зависимостей и оценки можно сделать следующие заключения:

1. Передача энергии протонов горячих зон электронам может обеспечить поток энергии достаточный для поддержания повышенной электронной температуры в субавро-
ральных областях даже в спокойные периоды.

2. Скорость передачи энергии зависит от квадрата концентрации заряженных частиц и она больше в приземных областях силовых трубок. Кроме этого такая зависимость может повысить эффективность передачи во время магнитных бурь при сжатии плазмосферы.

3. Более эффективны ионы низких энергий, с этой точки зрения сомнительна роль прямого нагрева ионосферных электронов протонами кольцевого тока.

4. Затухание Ландау, как известно, пропорционально производной функции распределения в области резонансных частиц. Для этого важно значение скорости установления максвелловского распределения, которое отмечалось выше. Присутствие невышнего хвоста тепловых электронов заметно снижает производную, т.е. и передачу энергии.

Одним из второстепенных механизмов, который, в свою очередь, может углублять эффект повышения T_e именно на высотах ниже 500 км, является понижение N_e , причинно связанное с ростом T_e [18]: Электроны хвоста максвелловского распределения с энергиями > 1 эВ с большой эффективностью возбуждают молекулы N_2 в вибро-
отно-колебательные состояния N_2^* и так как скорость реакции $O^+ + N_2 \xrightarrow{k_1} NO^+ + N$ повышается для N_2^* почти на два порядка [19] и скорость рекомбинации ионов NO^+ выше скорости процессов рекомбинации O^+ , в итоге понижается N_e . При этом необходимо отметить, что должна существовать температура T_e , оптимальная для понижения N_e , потому что, с одной стороны, k_1 повышается с ростом T_e , но, с другой стороны, скорость диссоциативной рекомбинации NO^+ k_2 понижается: $k_2 \sim T_e^{-(0,4+0,8)}$. Этот механизм имеет место в основном для высот ниже

ойных
вних.
ветотене
количест-
т протонов
и алек-
ыше ко-
локаль-
петок
порядок
оисвность
ронами
не учи-
х ско-
оения
тем-
ку-
 $\lambda = 20$
ни,
ни
для
реда-
во
483
T_e

500 км, где, во-первых, концентрация N_2 достаточно велика и, во-вторых, понижение концентрации ионов сказывается заметным образом в уменьшении одного из основных потоков энергии электронов.

Последним вопросом, пока не решенным, является существование непрерывного во времени источника энергии нагрева протонов горячих зон, или субавроральных появлений T_e , т.е. по-видимому, источника ионно-циклотронных волн. В первых работах предполагаемый кольцевой ток, состоящий из протонов, должен быстро нарушаться. Процессом исчезновения является диффузия частиц по пичч-углам и их попадание в конус потерь; другим, важнейшим механизмом, является перезарядка протонов с атомами водорода $H^{+*} + H \rightarrow H^+ + H^*$ с последующим уходом энергичных атомов водорода [20]. Несовпадение скорости исчезновения протонов и времени жизни кольцевого тока привело Тинсли [21] к предположению о заметном содержании He^+ в кольцевом токе, так как для ионов гелия сечение перезарядки почти на два порядка ниже чем для протонов. Не исключено содержание даже более тяжелых частиц (C^+ , N^+ , O^+). Другим возможным объяснением является некий механизм постоянной инжекции частиц в кольцевой ток. Измерения Франка [22] показали соединение плазменного слоя и кольцевого тока в области его соприкосновения с плазмосферой в послеполуночном секторе. Для объяснения или отклонения такой инжекции недостаточны экспериментальные данные и пока теоретически не решался.

4. Заключение

а) По измерениям на спутниках "Космос-378" и "Интеркосмос-8" было обнаружено почти постоянное существование повышенной электронной температуры. Повышения наблюдались в диапазоне высот 250-1600 км в субавроральных зонах, они располагаются на L-оболочках, проходящих внутри плазмосферы вблизи плазмосаузы.

б) Вероятным механизмом поддержания повышенной электронной температуры в магнито-соединенное время является нагрев протонов горячих зон ионно-циклотронными

ВОЛН
ИМО
вч
цево
прер
возбу
тронн
1. К.В
2. Р.В
J.С
3. D.L
4. С.В
76
5. J.M
Rea
6. D.J
419
7. J.A
227
8. В.В
9. J.S
21,
10. W.
11. E.
459
12. F.
13. L.
14. A.
net
15. K.L
Sci
16. G.F
610

волнами и передача их энергии электронам кулоновским взаимодействием.

в) Постоянство наблюдаемых повышений требует первичный источник ионно-циклотронных волн; постоянный кольцевой ток можно объяснить или содержанием He^+ , или непрерывным притоком частиц из плазменного слоя.

г) В ионосфере повышению T_e способствует процесс возбуждения молекул азота с последующим понижением электронной концентрации.

Литература

1. K.D.Cole. J.Geophys.Res., 70 (1965), 1689.
2. R.J.Roble, R.B.Norton, J.A.Findlay, E.Marovich. J.Geophys.Res., 76 (1971), 7648.
3. D.L.Carpenter, J.Geophys.Res., 76 (1971), 3644.
4. C.R.Chappell, K.K.Harris, G.W.Sharp. J.Geophys.Res., 76 (1971), 2357.
5. J.M.Cornwall, F.W.Coroniti, R.M.Thorne. J.Geophys. Res., 76 (1971), 4428.
6. D.J.Williams, L.R.Lyons, J.Geophys.Res., 79 (1974), 4195.
7. J.A.Joselyn, L.R.Lyons. J.Geophys.Res., 81 (1976), 2275.
8. В.В.Афонин, К.И.Грингауз, 1976, в печати.
9. J.Smilauer, K.Kubat. Trav.Geoph.Acad.Tchecoslov.Sci. 21, 457.
10. W.J.Raitt. J.Geophys.Res., 79 (1974), 4703.
11. E.J.Maier, S.Chandra. J.Geophys.Res., 80 (1975), 4591.
12. F.Jiricek. Personal communication, 1976.
13. L.A.Frank, J.Geophys.Res., 76 (1971), 2265.
14. A.A.Galeev. Physics of the hot plasma in the magnetosphere. Plenum Press, N.Y.1975, 251.
15. K.I.Gringauz. Preprint Space Res.Inst.USSR Acad. Sci., D-230, 1976.
16. G.P.Serbu, E.J.R.Maier. J.Geophys.Res., 75 (1970), 6102.

17. N.A.Krall, A.W.Trivelpiece. Principles of plasma physics. McGraw Hill, N.Y., 1973.
18. W.J.Raitt, R.W.Schunk, P.M.Banks. Planet.Space Sci. 24 (1976), 105.
19. W.Lindinger, F.C.Fehsenfeld, A.L.Schmeltekopf, E.E.Ferguson. J.Geophys.Res., 79 (1974), 4753.
20. P.H.Smith, R.A.Hoffman, T.A.Fritz. J.Geophys.Res., 81 (1976), 2701.
21. B.A.Tinsley. Evidence that the recovery phase ring current consists of helium ions. Preprint 1976.
22. L.A.Frank. J.Geophys.Res., 76 (1971), 2265.

эко
тако
измер
измер
трех,
нак
50 км
област
ни ВЧ
и, так
року о
нетчес
ной тем
ВЧ нап
вались
бует м
ри для
собност
ся друг
а) в те
опорног
чий зон
через п