

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ  
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

---

ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ГЕОФИЗИКИ

ТРУДЫ

ВЫПУСК 30

ФИЗИКА  
ОКОЛОЗЕМНОГО  
КОСМИЧЕСКОГО  
ПРОСТРАНСТВА

Под редакцией  
д-ра физ.-мат. наук  
А. Д. ДАНИЛОВА  
и канд. физ.-мат. наук  
Н. К. ПЕРЕЯСЛОВОЙ



МОСКОВСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ ГИДРОМЕТЕОИЗДАТА

---

МОСКВА — 1976

## ПОВЕДЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ИОНОСФЕРНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ НА СРЕДНИХ И СУБАВРОРАЛЬНЫХ ШИРОТАХ

Целью данной работы является изучение поведения  $T_e$  в ионосфере средних и субавроуральных широт по экспериментальным данным, полученным ИКИ АН СССР при помощи спутника «Космос-378», запущенного 17 ноября 1970 г. на орбиту с перигеем 240 км, апогеем 1700 км и наклоном 74°.

В числе многочисленных экспериментов на спутнике был установлен сферический высокочастотный зонд для измерения температуры. Данные, полученные со спутника, обрабатывали на ЭВМ БЭСМ-6. В результате строился график (рис. 1) зависимости  $T_e$  от параметров орбиты спутника.

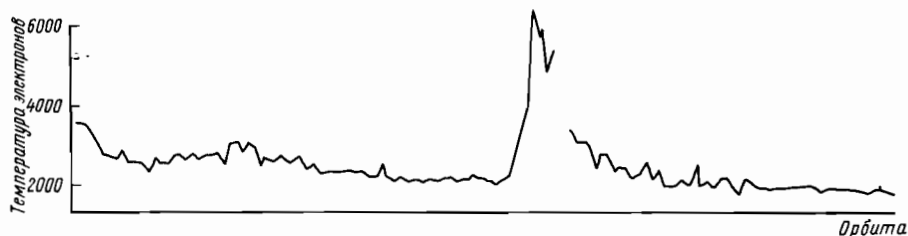


Рис. 1. Температура электронов, измеренная вдоль орбиты спутника «Космос-378»:  
 $K_p = 1_+$ ;  $D_{st} = -7$ ;  $F = 172$

Интерес представляют явные зависимости  $T_e$  от  $h$ ,  $\varphi$ ,  $LT$  и т. д. При полете спутника по орбите все эти параметры изменяются одновременно и выделение отдельных закономерностей весьма затруднено. В этом случае для получения требуемых сведений необходим большой массив данных, который можно проанализировать методом многофакторного анализа.

В данной работе при анализе учитывались следующие параметры: высота ( $h$ ), геомагнитная широта ( $\varphi$ ), местное время ( $LT$ ) и  $K_p$ , которые были разбиты следующим образом:

$\varphi$  — с 40 до 65° с интервалом в 2,5°;  $LT$  — от 0 до 24 ч с интервалом в 1 ч;  $K_p < 2_+$ ,  $2_+ \leq K_p \leq 4_+$ ;  $K_p > 5_-$ .

Таким образом, в процессе работы строилось 288 графиков, соответствующих числу интервалов  $LT$  и  $\varphi$ .

Для построения статистически верной картины данных было недостаточно (в настоящее время время из 360 сеансов НП обработано около 200, а с каждого сеанса снимается 5—10 точек). Положение усугублялось тем, что в процессе эволюции орбиты спутника некоторые области пространства параметров вообще не исследовались,

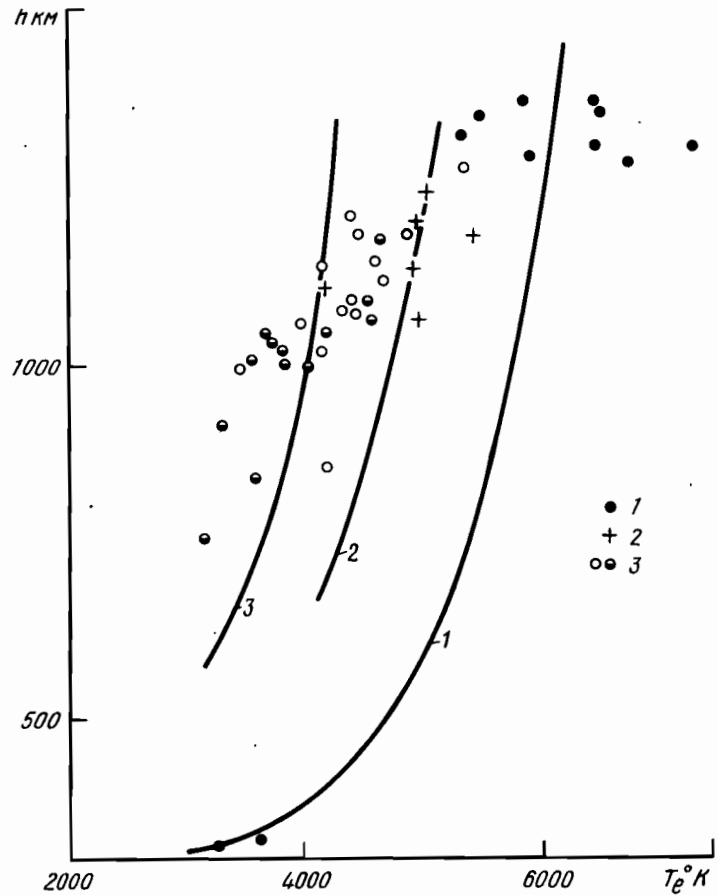


Рис. 2. Высотные профили  $T_e$  ( $h$ ) в дневное время (15—17 ч):

1 —  $\psi = 40-47,5^\circ$  с. ш.; 2 —  $\psi = 50-52,5^\circ$  с. ш.;  
3 —  $\psi = 52,5-57,5^\circ$  с. ш.; 4 —  $\psi = 57,5-65^\circ$  с. ш.

например область перигея в дневные часы. Но все-таки удалось выявить некоторые закономерности поведения  $T_e$  в ночное время и послеполуденные часы в интервале геомагнитных широт  $40-60^\circ$  с. ш.

Полученные результаты показаны на рис. 2, 3, где по множеству экспериментальных точек проведены сплошные линии, представляющие высотные профили  $T_e$  ( $h$ ). Эти кривые, несмотря на недостаток экспериментальных данных, качественно отражают вы-

сотные профили  $T_e(h)$  и их вариации с широтой, поскольку границы кривых построены по достаточно большому количеству экспериментальных точек (каждая точка на рис. 2, 3 является усреднением  $\sim 10$  измерений).

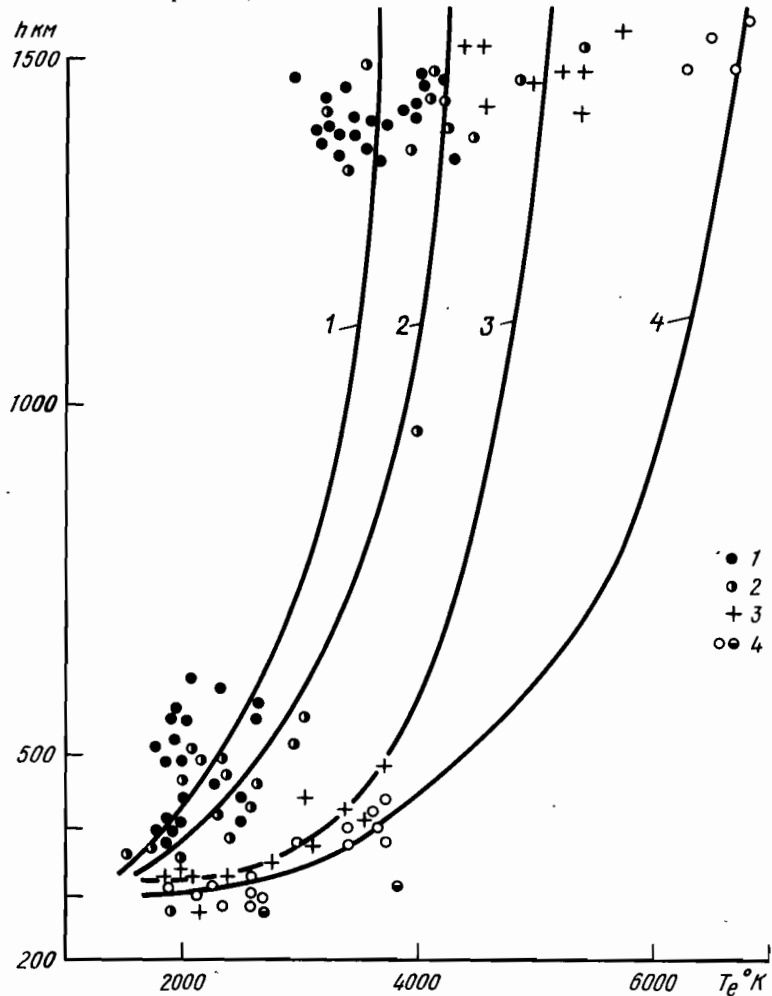


Рис. 3. Высотные профили  $T_e(h)$  в ночное время (23—02 ч):  
 1 —  $\varphi = 40-42,5^\circ$  с. ш.; 2 —  $\varphi = 42,5-47,5^\circ$  с. ш.;  
 3 —  $\varphi = 50-52,5^\circ$  с. ш.; 4 —  $\varphi = 52,5-57,5^\circ$  с. ш.;  
 $\varphi > 57,5^\circ$  с. ш.

На рис. 2 построены зависимости  $T_e(h)$  в дневное время (15—17 ч). На этом рисунке отчетливо видно, что с увеличением широты температура на данной высоте падает. В ночное время (23—02 ч) (рис. 3) отчетливо удалось проследить зависимость  $T_e(h)$  в диапазоне широт 40—57° с. ш. В отличие от результатов,

полученных в дневное время (рис. 2), видно, что с увеличением широты температура растет. Измерения  $T_e$  в ионосфере в 1970—1971 гг. на спутнике «Космос-378» свидетельствуют о большом разнообразии тепловых характеристик в ионосфере.

На рис. 4 показаны результаты измерений  $T_e$  в диапазоне 40—70° геомагнитной широты. Из этого рисунка видно, что в диапазоне широт  $\varphi = 50 \div 63^\circ$  имеется область повышения  $T_e$ , причем при каждом отдельном пролете спутника положение по широте и размеры этой области изменяются от витка к витку.

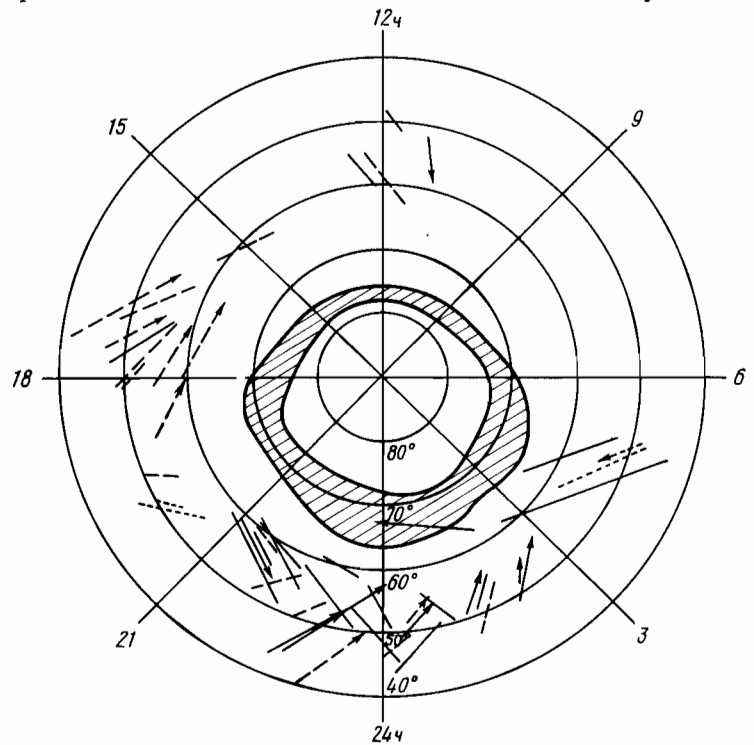


Рис. 4. Зона возрастания  $T_e$

Эти повышения могут занимать по широте как зону в несколько градусов, так и всю возмущенную область 50—60°.

На основании приведенных результатов, а также совокупности имеющихся данных можно сделать вывод, что на этих широтах как в ночной, так и в дневной ионосфере иногда имеются дополнительные источники нагревания плазмы.

В этом интервале геомагнитных широт помимо общего плавного увеличения  $T_e$  относительно часто наблюдаются очень резкие большие «всплески» температур (6000—8000°K). Пример такого роста указан на рис. 1.

Для изучения этого явления было решено рассмотреть зависимость его от местного времени  $LT$  и геомагнитной широты. Для

этого отбирались витки, на которых отмечены возрастания  $T_e$  (при подлете спутника к этой области широт  $T_e$  быстро, иногда в течение 10 с, возрастает на значительную величину порядка  $1000^\circ\text{K}$  и более).

Широтный интервал повышения  $T_e$  легко выделяется по графику визуально (по заметному отклонению  $T_e$  от невозмущенных значений  $T_e$ , наблюдаемых до подхода спутника к этой зоне и после нее — рис. 1).

На рис. 4 указаны участки орбиты, во время пролета которых были зарегистрированы повышенные значения  $T_e$ . Отрезки без стрелок указывают на то, что в этом сеансе были четко видны начало и конец «всплеска»  $T_e$ . Стрелка указывает, что в этом месте был прерван сеанс непосредственной связи со спутником «Космос-378».

На рис. 4 выделены сеансы с различными  $K_p$ -индексами: сплошной линией указаны сеансы НП во время относительно спокойных  $K_p < 2_0$ , пунктиром — умеренное возмущение  $2_0 \leq K_p \leq 4_0$  и штрихами  $K_p > 4_0$ .

Одновременно была исследована зависимость величины возрастания  $T_e$  в зависимости от  $K_p$ -индекса.

В результате получилось, что величина возрастаний  $T_e$  в данной области широт не зависит от  $K_p$ .

Для сравнения на рис. 4 заштрихована зона полярных сияний (овал Фельдштейна). Видно, что вне зависимости от местного времени зона «возмущенных» значений  $T_e$  находится южнее зоны полярных сияний.

В процессе работы над рис. 4 отмечалась (окраской) максимальная величина  $T_e$  данного «всплеска» (500, 1500, 2000 и более  $3000^\circ\text{K}$ ). Как оказалось, расположение повышенной  $T_e$  в координатах  $LT - \varphi$  не имеет явно выраженных закономерностей. Поэтому в окончательном варианте на рис. 4 изменения значений  $T_e$  по величине не указаны.

Для сравнения с экспериментальными результатами была предпринята попытка теоретического изучения поведения  $T_e$  в зависимости от высоты, от величины и природы источника нагрева ионосферы в ночное время. Для этого решалось уравнение теплового баланса в предположении, что источником нагрева является поток энергичных электронов (так как солнечный ультрафиолетовый источник в ночное время отсутствует) с учетом теплопроводности и без учета нестационарного члена

$$-\frac{\partial}{\partial h} \left( K_e \sin^2 I \frac{dT_e}{dh} \right) = Q - L, \quad (1)$$

где  $Q$  и  $L$  — скорость притока и потерь тепла единицы объема электронного газа.

Член, учитывающий скорость нагрева ионосферы энергичными частицами, был взят из [1], откуда следует, что

$$Q = 1,5q (\text{эВ} \cdot \text{см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}), \quad (2)$$

где  $q$  — полная скорость ионизации за счет падающего потока частиц ( $\text{см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ ).

Расчет был произведен для потока частиц с энергией  $E=1$  кэВ. Величина потока была взята из результатов измерения при помощи электростатического анализатора, установленного на спутнике «Космос-378», и равнялась  $3 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$ . Значения для полной скорости ионизации от падающего потока частиц с  $E=1$  кэВ были рассчитаны из данных, взятых из работы Риза [2]. Скорости охлаждения окружающих электронов, вызванные различными процессами взаимодействия ионосферных электронов с ионами и нейтральными частицами, взяты из работы [3].

Здесь учитываются взаимодействия с  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{O}$  и  $\text{O}^+$ , так как они оказывают наибольшее влияние на охлаждение окружающего электронного газа.

Нейтральная модель взята из работы Яккия [4] для периода солнечного равнодействия.

Тэксосферы =  $1000^\circ\text{K}$ ,  $LT=02\ 00$ ,  $\varphi=50^\circ$  с. ш.,  $F=155$ ,  $K_p=0$ .

Профиль концентрации электронов взят из работы [5]. Так как ионосфера нейтральна, а из ее ионного состава мы рассматриваем только ионы  $\text{O}^+$ , то  $h[\text{O}^+] = h[e]$ . Предполагалось что температура ионов равна температуре нейтрального газа  $T_i = T_h$ . Коэффициент теплопроводности  $K_e$  взят в виде, предложенном Спитцером, для полностью ионизированного газа

$$K_e = 7,7 \cdot 10^5 T_e^{5/2} \text{ эВ} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{град}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Это дифференциальное уравнение второго порядка (1) было разбито на систему двух уравнений первого порядка:

$$1. \frac{dT_e}{dh} = D(1),$$

$$2. \frac{dD(1)}{dh} = \frac{Q - L_{\text{O}^+}(h, T_e, T_h) - L_{\text{N}_2}(h, T_e, T_h) - L_{\text{O}_2}(h, T_e, T_h)}{7,7 \cdot 10^5 \sin^2 I T_e^{5/2}} - \frac{L_0(h, T_e, T_h) - 18,25 \cdot 10^5 T_e^{3/2} D(1)^2 \sin^2 I}{7,7 \cdot 10^5 \sin^2 I T_e^{5/2}}$$

и решалось методом Рунге-Кутты с начальными условиями:

$$1. T_e|_{h=120} = T_h; \quad 2. \left. \frac{dT_e}{dh} \right|_{h=h_{\text{макс}}} = A,$$

где  $A$  — заданная величина.

Для решения этого уравнения была составлена программа на языке «Фортран» для ЭЦВМ БЭСМ-6. Логика программы составлена так, что машина, начиная с некоторого заданного значения

$T_e^B$  на верхней границе, производила подбор  $T_e^B$  до тех пор, пока разность  $(T_e - T_h)|_{h=120}$  не становилась меньше заданной величины.

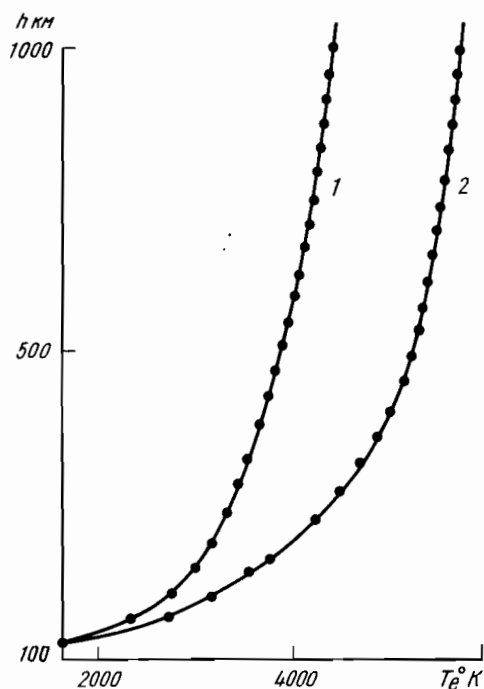


Рис. 5. Теоретические профили  $T_e(h)$  в ночное время (02 ч):

$$1 - \left. \frac{dT_e}{dh} \right|_{1000 \text{ км}} = 1^\circ\text{K/км};$$

$$2 - \left. \frac{dT_e}{dh} \right|_{1000 \text{ км}} = 2^\circ\text{K/км}$$

Результаты вычислений показаны на рис. 5. Расчет выполнялся для двух случаев:

$$\left. \frac{dT_e}{dh} \right|_{h=1000} = 1^\circ\text{K/км} \text{ и } \left. \frac{dT_e}{dh} \right|_{h=1000} = 2^\circ\text{K/км}$$

при заданном  $Q$ .

### Обсуждение полученных результатов

$T_e(h)$  характеризуются высокими значениями  $T_e$  на высотах  $>300$  км.

На высоте 1500 км днем на широтах  $\varphi=40 \div 47,5^\circ$  с. ш.  $T_e \sim 5000-7000^\circ\text{K}$ , а ночью  $T_e = 2500 \div 4000^\circ\text{K}$ . Теоретические расчеты выполнены с учетом теплопроводности и показывают [6], что днем на средних широтах на высоте  $h=1000$  км  $T_e$  может достигать  $3000-4000^\circ\text{K}$ .

По данным некогерентного рассеяния, полученным в Милстон-Хилле зимой 1967—1968 гг. [7], днем на  $h=1000$  км  $T_e = 3500^\circ\text{K}$ ,



ночью  $T_e = 2700^\circ\text{K}$ . Высотный градиент  $dT/dh$  по данным различных экспериментов, проведенных до 1970 г., приведен в таблице:

Таблица

Год	Метод	Высота, км	Время суток	$dT_e/dh$	Литература
1965	Некогерентного рассеяния	1000	Ночь	0,9	Неги, Уолкер [8]
		1000	»	0,17	
1966	Зонд Ленгмюра	300	День	1,5	Брейс
1966	Некогерентного рассеяния	300—2000	»	2	Эванс [9]
1967	Зонд Ленгмюра	1000	»	1,5—3	Эванс [7]
1969	ВЧ-зонд	300—500	»	5	Шмилауэр [10]
1970		500	»	3	

Оценки по данным спутника «Космос-378» показывают, что в дневное время на высотах 400—1200 км  $dT/dh = 3—4^\circ\text{K}/\text{км}$ . Из этих данных видно, что по мере приближения к максимуму солнечной активности  $dT/dh$  в ионосфере увеличивается от 1 до  $3^\circ\text{K}/\text{км}$  на высоте 1000 км. С учетом этого, если результаты по станции Милстон-Хилл привести к высоте 1500 км, получится величина  $T_e = 5000^\circ\text{K}$  в дневное время. По наиболее близким из имеющихся в литературе результатам измерения  $T_e$  на спутнике ESRO=1A зимой 1968—1969 гг. температура электронов на высоте  $h = 1200$  км ночью на широтах  $30—40^\circ$  составляет  $2700^\circ\text{K}$ .

Таким образом, полученные на спутнике «Космос-378» значения  $T_e$  в ночное время хорошо согласуются с имеющимися в литературе наиболее близкими по времени изменениями  $T_e$ , а в дневное время они несколько выше.

Достаточно уверенные выводы относительно формы графиков  $T_e(h)$  можно сделать только для ночного времени (рис. 3). В дневное время (рис. 2) нет данных на малых высотах. Ночью на всех широтах  $\varphi > 40^\circ$  на высоте 300—500 км происходит очень быстрый рост  $T_e$  (рис. 3). Средний высотный градиент быстро увеличивается с ростом широты и составляет  $4^\circ\text{K}/\text{км}$  на  $\varphi = 40^\circ$  и  $15—20^\circ\text{K}/\text{км}$  на  $\varphi = 52,5—57,5^\circ$  с. ш.

В ночное время на приведенных профилях отсутствуют данные для высот 500—1200 км. Можно полагать, что рост  $T_e$  с высотой происходит монотонно, так как монотонность роста  $T_e$  на этих высотах может нарушаться лишь при наличии в этом диапазоне высот интенсивных локальных источников нагрева электронного газа. В настоящее время неизвестно ни одного источника нагрева, локализованного в этой области.

Как видно из рис. 2, 3, высотные градиенты  $T_e(h)$  сильно зависят от местного времени. В 15—17 ч LT с увеличением  $\varphi$  от  $40$  до  $57,5^\circ$  с. ш.  $T_e$  на больших высотах уменьшается от  $5000—7000^\circ\text{K}$  до  $3000—4000^\circ\text{K}$ . Ночью имеет место обратная зависимость: с ро-

стом  $\varphi = 40 \div 57^\circ$  с. ш.  $T_e$  возрастает от  $2500 \div 4000^\circ\text{K}$  до  $6000 \div 7000^\circ\text{K}$ , причем ночной субавроральный ( $\varphi = 50 \div 60^\circ$ ) профиль практически совпадает по величине  $T_e$  с дневным среднеширотным ( $\varphi = 40^\circ$  с. ш.). Из этого следует, что на субавроральных широтах  $\varphi = 50 \div 60^\circ$  ночью присутствует интенсивный источник нагрева, мощность которого равна мощности среднеширотного источника нагрева в дневное время.

В этой же области субавроральных широт примерно в 30% пролетов спутника регистрируются значительные возрастания «всплесков»  $T_e$  (до 2,5—3 раз ночью и 1,5 днем). Распределение этих возрастаний по широте и местному времени показано на рис. 4. Из этого рисунка видно, что эти возрастания занимают круговую зону шириной  $\sim 10^\circ$  ( $\varphi = 50 \div 60^\circ$ ). Следовательно, во время наблюдений этого эффекта либо интенсивность описанного источника нагрева увеличивается, либо появляется новый дополнительный источник нагрева. Было проведено сравнение экспериментальных (рис. 2, 3) и теоретических профилей (рис. 5), полученных в данной работе.

На ночных экспериментальных профилях для  $\varphi = 50—60^\circ$  с. ш. быстрый рост  $T_e$  начинается примерно с высоты  $h \sim 300$  км. В теоретических профилях, вычисленных в предположении, что источником нагрева являются потоки электронов ( $5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3} \cdot \text{сек}^{-1}$ ) с энергией  $E = 1$  кэВ, быстрый рост  $T_e$  начинается с высоты  $h = 120—150$  км.

Поскольку, согласно (2), электроны с такой энергией поглощаются именно в этом интервале высот, следовательно, если предположить, что постоянно действующим источником нагрева электронного газа на субавроральных широтах являются потоки энергичных электронов, то их энергия должна быть значительно ниже, чем 1 кэВ (при увеличении  $E$ , согласно (2), высота максимального поглощения таких электронов понижается).

### Заключение

В результате обработки экспериментальных данных по измерению температуры электронов на спутнике «Космос-378» получены высотные профили  $T_e(h)$ , методом многофакторного анализа выявлены особенности поведения  $T_e$  в диапазоне субавроральных геомагнитных широт.

1. На средних и субавроральных широтах  $>40^\circ$  ночью высотные профили на высотах  $h = 300 \div 1500$  км монотонны, с быстрым ростом на высотах  $h = 300 \div 500$  км.

2. На средних широтах для высот  $h = 1500$  км днем  $T_e = 5000 \div 7000^\circ\text{K}$ , ночью  $T_e = 2500 \div 4000^\circ\text{K}$ .

3. Ночью на всех широтах  $\varphi > 40^\circ$  на высоте  $300 \div 500$  км средний высотный градиент быстро увеличивается с ростом широты и составляет  $4^\circ\text{K}/\text{км}$  на  $\varphi = 40^\circ$  и  $15 \div 20^\circ\text{K}/\text{км}$  на  $\varphi = 52,5 \div 57,5^\circ$  с. ш.

4. Обнаружен дополнительный постоянно действующий источник нагрева ионосферной плазмы в **ночное время на субавроральных широтах**. Мощность этого источника нагрева по порядку ве-

личины равна мощности источника нагрева в дневное время на средних широтах.

5. На этих широтах ( $\varphi = 50 \div 60^\circ$ ) примерно в 30% пролетов наблюдаются возрастания (всплески) до 2,5—3 раз в ночное время и 1,5 раза днем. Эти возрастания расположены внутри круговой зоны шириной  $10^\circ$  на широтах  $\varphi = 50 \div 60^\circ$  с. ш.

6. Причиной упомянутых возрастаний (всплесков) может быть либо увеличение интенсивности постоянно действующих на этих широтах источников, либо появление нового, дополнительного источника.

7. В результате расчета было установлено, что если постоянно действующим источником нагрева ионосферных электронов на субавроральных широтах являются потоки электронов, то их энергия должна быть значительно меньше 1 кэВ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dalgarno A. M., McElroy B., Moffett R. J. Electron temperatures in the ionosphere. — «Pl. Sp. Sci.», 1963, 11, p. 463.
2. Rees M. H. — «Pl. Sp. Sci.», 1963, 11, p. 1209.
3. Banks P. M. The thermal structure of the ionosphere. Proc. of the IEEE, 1969, 57, N 3.
4. Jacchia L. G. Revised static models of the thermosphere and exosphere with empirical temperature profiles. 1971. May 5. Research in Space Science SAO Special Report. N 332.
5. Baner Z. I. I: Electron Density Profiles in Ionosphere and Exosphere. Ed by Frihagen. North-Holland Publ. Co. Amsterdam. 1966.
6. Geisler J. E., Bowhill S. A. Ionospheric temperatures of solar minimum. — «J. Atm. and Ter. Phys.», 1969, 27, p. 457.
7. Evans I. V. The heating of the protonosphere, — «Sp. Res.», 1967, 7, p. 717.
8. Nagy A. F., Walker J. C. G. — «Pl. Sp. Sci.», 1967, 15, p. 95.
9. Эванс Дж. В. Температура нейтральных и заряженных частиц в ионосфере. — «УФН», 1967, вып. 2, с. 229.
10. Афонин В. В., Гдалевич Л. Г., Грингауз К. Н., Кайнарова Н. Я., Шмиллауэр Я. — «Космические исследования», 1973, 11, № 2.