

УДК 550.385.41

© 1994 г. В. В. Афонин, К. В. Гречнев, В. А. Ершова,  
О. З. Ростэ, Н. Ф. Смирнова, Ю. А. Шульчишин,  
Я. Шмилауэр

**ИОННЫЙ СОСТАВ И ТЕМПЕРАТУРА ИОНОСФЕРЫ  
В МАКСИМУМЕ 22 ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ,  
ПОЛУЧЕННЫЕ СО СПУТНИКА «ИНТЕРКОСМОС-24»  
(ПРОЕКТ «АКТИВНЫЙ»)**

*Институт космических исследований РАН  
Геофизический институт Чешской АН*

Представлены масс-спектрометрические и зондовые данные по абсолютным и относительным концентрациям ионов  $O^+$ ,  $N^+$ ,  $H^+$ ,  $He^+$ , суммарной ионной концентрации, электронной и ионной температурам, полученные на спутнике «Интеркосмос-24», в интервале высот 500+2500 км в спокойных геомагнитных условиях в период максимума солнечной активности 22 цикла. В этот период наблюдались повышенные концентрации и температуры. На инвариантных широтах  $\pm 35^\circ$  концентрация  $O^+$  в области перигея в освещенное время суток доходила до  $(1+3) \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ . Ионная температура  $T_i$  для этих условий — 1200+1500 К, электронная — 2500+3000 К. В области главного ионосферного провала на высотах порядка 1000 км электронная температура часто поднимается до 6000+7000 К; ночью она ниже дневной примерно на 500 К. Предполагается, что высота максимума F<sub>2</sub>-слоя ночью летом на средних широтах могла достигать 500—520 км с величиной концентрации ионов  $6 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ . В экваториальной области часто ярко выражена геомагнитная аномалия с горбами в ионной концентрации примерно на  $\pm 15^\circ$  инвариантной широты. Уровень перехода от концентрации  $O^+$  к  $H^+$  увеличивается от низких широт к высоким как днем, так и ночью. Днем он изменялся от 1300+1400 км в районе экватора до 2400+2500 км на магнитных широтах 40+45°, а ночью от 900+1000 км до 1200+1400 км в этих же широтных областях. Отмечено достаточно частое преобладание ионов  $He^+$  над  $H^+$  и  $O^+$  больше чем на порядок величины, на инвариантных широтах выше 70°.

V. A. Afonin, K. V. Grechnev, V. A. Ershova, O. Z. Roste, N. F. Smirnova, J. Shmilauer, J. A. Shultchishin. Ion composition and temperature of ionosphere at maximum of 22 solar activity cycle from satellite «Intercosmos-24» («Activniy» project). Mass-spectrometer and probe ion  $O^+$ ,  $N^+$ ,  $H^+$ ,  $He^+$  densities, total ion density and electron and ion temperatures data from «Intercosmos-24» satellite are presented. Data obtained for the altitude range from 500 km to 2500 km at the magnetically quiet conditions during maximum of 22 cycle solar activity. During this period increased densities and temperatures were observed. At invariant latitudes  $\pm 35^\circ$  at the sunlit perigee region  $O^+$  densities reached to  $(1+3) \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$ . At these conditions the ion temperature was 1200—1500 K and the electron temperature was 2500+3000 K. In the main ionospheric trough region at the altitudes about 1000 km the electron temperature increased often up to 6000—7000 K. At night the electron temperature is about 500 K lower than that in the daytime. It is proposed that the midlatitude summer F<sub>2</sub> layer maximum altitude at night could reach to 500+520 km with ion density  $6 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$ . In the equatorial region the well expressed geomagnetic anomaly was

ев, В. А. Ершова,  
Л. Шульчишин,

А ИОНОСФЕРЫ  
ОЙ АКТИВНОСТИ,  
ТЕРКОСМОС-24»

ний РАН  
ой АН

данные по абсолютным и отно-  
арной ионной концентрации,  
путнике «Интеркосмос-24», в  
условиях в период максимума  
сь повышенные концентрации  
трация  $O^+$  в области перигея  
ная температура  $T_e$  для этих  
ласти главного ионосферного  
ратура часто поднимается до  
С. Предполагается, что высота  
гла достигать 500—520 км с  
и области часто ярко выражена  
имерно на  $\pm 15^\circ$  инвариантной  
дличивается от низких широт  
от 1300+1400 км в районе  
а ночью от 900+1000 км до  
статочное частое преобладание  
м, на инвариантных широтах

Z. Roste, N. F. Smirnova,  
temperature of ionosphere at  
mos-24» («Activniy» project).  
total ion density and electron  
e presented. Data obtained for  
tically quiet conditions during  
sed densities and temperatures  
ee region  $O^+$  densities reached  
e was 1200—1500 K and the  
ic trough region at the altitudes  
to 6000—7000 K. At night the  
aytime. It is proposed that the  
reach to 500+520 km with ion  
sed geomagnetic anomaly was

often observed with Ni crests located at about  $\pm 15^\circ$  invariant latitudes. The  $O^+ - H^+$  transition level increases from lower to higher latitudes both in the daytime and at night. In the daytime it was observed to change from heights 1300+1400 km in equatorial region to 2400+2500 km at the magnetic latitudes 40—45°. At night this level changes in these latitude regions from 900—1000 km to 1200+1400 km. Predominance of  $He^+$  ions above  $H^+$  and  $O^+$  was observed rather often at the latitudes more than  $70^\circ$ .

Существующие в настоящее время ионосферные модели, включая известную модель IRI, плохо представляют состав даже основных ионных компонентов, в частности из-за отсутствия достаточной базы данных. Модельное описание температур электронов и ионов также обладает рядом существенных недостатков, особенно в экваториальной области. Необходимо дальнейшее изучение поведения ионного состава и температуры ионосферной плазмы с использованием новых данных.

Непосредственные измерения ионного состава проводились ловушками и масс-спектрометрами на разных спутниках: серииOGO, Explorer, ISIS, Aeros, AE и др. [1]. Практически во всех этих экспериментах также измерялись электронные концентрация и температура. Однако эти данные относятся в основном к периоду малой или средней солнечной активности 20 цикла.

Представленные в данной статье результаты измерений, полученные масс-спектрометром, плоской ионной ловушкой и высокочастотным зондом на спутнике «Интеркосмос-24» в рамках проекта «Активный», относятся к периоду высокой солнечной активности 22 цикла (1989 г.—157,6), сравнимой с максимальной активностью 19 (1957 г.—190,2) и 21 (1979 г.—155,4) циклов. В скобках указаны средние числа солнечных пятен за самый активный год цикла.

Прямые измерения ионного состава во время максимума активности 19 цикла проводились редко и с ограниченным набором измеряемых ионов [2]. Для периода высокой активности 21 цикла были опубликованы данные по ионному составу, полученные масс-спектрометром на спутниках ISS-B и DE-1 [3—5]. На этих же спутниках, а также на DE-2 измерялись электронные концентрация и температура [6].

Из сказанного выше следует, что данные по ионному составу и температуре, полученные в эксперименте «Активный» в максимуме 22 цикла солнечной активности очень актуальны. Ценность данных увеличивается благодаря возможности взаимных уточнений результатов измерений ловушки и масс-спектрометра, что позволяет обеспечить большую надежность данных по ионному составу.

Цель статьи показать, какой была фоновая ионосфера в области высот 500+2500 км в спокойных геофизических условиях в период высокой солнечной активности. Будет уделено внимание таким ионосферным данным, как абсолютная и относительная концентрации основных ионов  $O^+$ ,  $N^+$ ,  $H^+$ ,  $He^+$ , высота перехода от ионов кислорода к ионам водорода, относительное содержание ионов гелия в период высокой солнечной активности, а также ионная и электронная температуры.

Спутник «Интеркосмос-24», на борту которого находился, в частности, комплекс приборов для измерений плазмы, запущен по проекту «Активный» 28.IX.1989 г. [7]. Предлагаемая статья посвящается результатам, полученным тремя инструментами: плоской ионной ловушкой (анализатором с тормозящим потенциалом) для измерения температуры и концентраций ионов, высокочастотным зондом для измерения электронной температуры (объединенными в приборе КМ-6) и радиочастотным масс-спектрометром (прибором НАМ-5) для измерения ионного состава окружающей плазмы.

Спутник запущен на орбиту с параметрами: апогей около 2500 км, перигей около 500 км, наклонение  $82^\circ$ , период обращения вокруг Земли — 1 ч 56 мин. Спутник имеет трехосную стабилизацию, ось X ориентирована по вектору скорости. Для приводимых в статье орбит угол между осью X и вектором скорости (угол атаки) не превышал  $15^\circ$ .

Рассматриваются совместные данные, полученные указанными выше приборами с 20.X.1989 г. по май 1991 г. За это время получена информация как в телеметрическом режиме непосредственной передачи, так и воспроизведения, причем объем сеанса воспроизведения (в зависимости от режима телеметрии) составляет от четверти витка до 9 витков.

Обработанный к настоящему времени материал охватывает разные периоды суток; сезоны, различные высотно-широтные и долготные области, что дает возможность использовать его для целей моделирования ионосферы.

### Описание аппаратуры

Ионный состав измерялся масс-спектрометром НАМ-5, состоящим из датчика и электронного блока. Прибор создан в развитие серии масс-спектрометров для измерения верхней атмосферы: НАМ-1р, НАМ-3 и НАМ-4. Датчик установлен на штанге с продольной осью датчика, расположенной вдоль направления полета. Он представляет собой радиочастотный анализатор беннетовского типа [8], на входе которого находится ионный источник. При работе в ионном режиме ионный источник выключен. Вблизи входного отверстия анализатора размещен изолированный электрод для измерения плавающего потенциала относительно корпуса спутника. Питание сеток анализатора подается относительно потенциала этого электрода, что позволяет практически скомпенсировать влияние потенциала спутника на измерение ионов. Электроника прибора дает возможность иметь 32 программы, включающие разные режимы работы прибора, отличающиеся, например, разным массовым диапазоном, чувствительностью, разрешением. Имеется возможность менять некоторые режимы работы «на лету», а также проводить на борту частичную обработку. В данном эксперименте реализован диапазон концентраций ионов  $0,1+3 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ , режимы с разрешением от 10 до 20 (на уровне 10% высоты пика), диапазон масс с 1 до 65 а. е. м., причем в разных программах использованы разные поддиапазоны масс. Возможности прибора позволяют получить больший динамический диапазон примерно на порядок величины, разрешение до 30 и диапазон масс до 140 а. е. м. Прибор измеряет относительные концентрации ионов. Точность определения отношений  $\text{He}^+/\text{H}^+$  и  $\text{N}^+/\text{O}^+$  не хуже 10%, а отношений  $\text{O}^+$  и  $\text{N}^+$  к легким компонентам не хуже 20% с учетом того факта, что угол атаки может доходить до  $15^\circ$ .

Концентрации ионов  $N_i$ , температуры электронов  $T_e$  и ионов  $T_i$  измерялись прибором КМ-6, представляющим собой развитие серии приборов типа КМ, применявшихся на многих спутниках и ракетах. Для измерения  $N_i$  и  $T_i$  использовалась плоская ионная ловушка, ориентированная по вектору скорости спутника. Величины  $N_i$  и  $T_i$  определялись в результате сложной математической обработки вольт-амперных характеристик (интегральных энергетических спектров) с использованием метода подбора параметров аналитической модели к экспериментальным данным [9]. Величина  $T_e$  определялась при помощи высокочастотного зонда электронной температуры [10, 11]. В приборе КМ-6 использовались три высокочастотных зонда электронной температуры, ориентированные по трем взаимно-перпендикулярным направлениям. Все эти датчики были объединены в один блок ИПХП (измеритель параметров холодной плазмы), который для уменьшения влияния потенциала корпуса на результаты измерения был установлен на штанге, направленной вперед по вектору скорости космического аппарата (КА). Для повышения точности измерений корпус блока ИПХП был изолирован от корпуса КА, и его потенциал регулировался так, что его отличие от потенциала плазмы не превышало 0,1 В. Диапазон измерения концентраций  $10^2-5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ , температуры электронов  $500+100\ 000 \text{ К}$ .

Калибровка прибора НАМ-5 проводилась следующим образом. Масс-спектрометр измеряет относительный состав ионов. Поэтому для получения абсолютных концентраций ионов проводилась калибровка сравнением полного ионного тока с результатами прибора (КМ-6), измеряющего суммарную ионную концентрацию.

Такая калибровка возможна, поскольку масс по радиодиапазону прибора эп

Для топ к отдельным дилось в до На витках, прибора КМ витков. По

Во время  $\text{He}^+$ ,  $\text{O}^+$ ,  $\text{N}^+$  малые ионы магния (M) кислород (ионам  $\text{H}^+$ ,

На рис. полученные ( $\text{H}^+$  и  $\text{He}^+$ )  $T_e$  и  $T_i$  в до

Вольт-амперные позволили провести а

казанными выше приборами информация как в режиме телеметрии)

тывает разные периоды времени, что дает информацию об ионосфере.

состоящим из датчика масс-спектрометров для измерения направления полета. Датчик установлен на приборного типа [8], на ионном режиме ионный детектор размещен изолированно относительно корпуса аппарата. Влияние потенциала этого датчика на возможность иметь 32 канала, отличающиеся, например, разрешением. Имеется возможность проводить измерения в диапазоне от 10 до 20 м. В. м., причем в разных частотах прибора погрешность на порядок величины. Прибор измеряет отношения  $He^+/H^+$  к компонентам не хуже 1 до 15°.

ионов  $T_i$  измерялись приборами типа КМ, измерения  $N_i$  и  $T_i$  осуществлялись с помощью прибора скорости спутника. Математической обработки спектров) с использованием модели к экспериментальным данным высокочастотного спектра использовались три калиброванные по трем каналам были объединены в каналы, который для измерения был установлен на аппарате космического аппарата блока ИПХП был установлен так, что его отличие от измерения концентраций

разом. Масс-спектрометрия абсолютных значений ионного тока и абсолютную концентрацию.

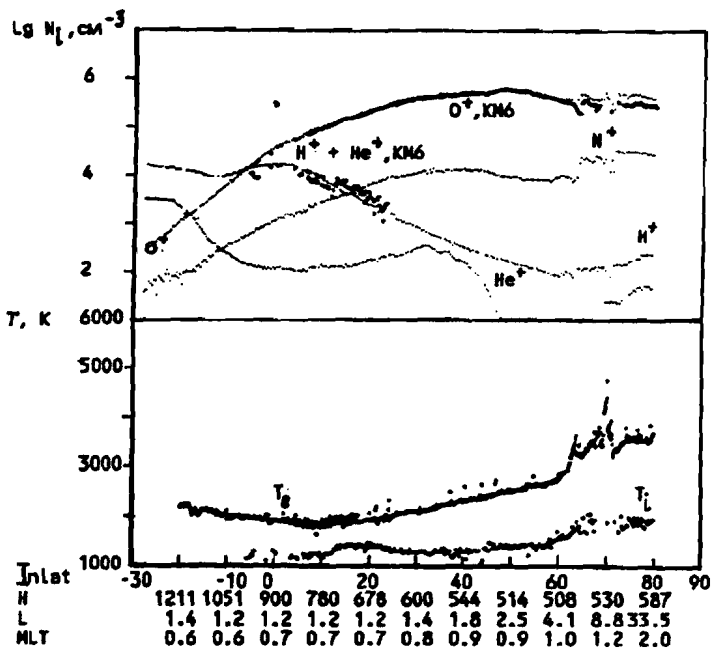


Рис. 1. Температуры  $T_g$ ,  $T_i$  и концентрации  $O^+$ ,  $KM6$  и  $H^+ + He^+$ ,  $KM6$  — получены прибором  $KM6$ , а концентрации ионов  $O^+$ ,  $H^+$ ,  $N^+$  и  $He^+$  — масс-спектрометром  $NAM5$  на витке 2886 18.V.1990 г. Долгота прохождения экватора  $274^\circ$

Такая калибровка позволяет также уточнить и относительный состав ионов, поскольку (хотя прибор фактически и не имеет дискриминации в измерении масс по развертке) в полет он был настроен с большей чувствительностью в диапазоне легких масс. Кроме этого необходимо отметить, что чувствительность прибора эпизодически изменялась экспериментаторами во время полета.

Для того чтобы получить прямую калибровку абсолютной чувствительности к отдельным ионным компонентам, сравнение с данными прибора  $KM-6$  проводилось вдоль орбиты в местах, где существенно преобладают либо  $O^+$ , либо  $H^+$ . На витках, где невозможно получить калибровку сравнением данных с данными прибора  $KM-6$ , принимались значения калибровочных коэффициентов ближайших витков. Подробнее о калибровке данных на конкретных витках говорится ниже.

### Результаты измерений и обсуждение

Во время полета масс-спектрометром измерялись атомарные компоненты  $H^+$ ,  $He^+$ ,  $O^+$ ,  $N^+$  и молекулярные ионы:  $N_2^+$ ,  $NO^+$ ,  $O_2^+$ . Прибор зарегистрировал также малые ионные составляющие: дейтерий (или  $He^{++}$ ,  $M/Z = 2$ ), кислород-18, ионы магния ( $M = 24$ ), железа ( $M = 56$ ), дважды ионизованные компоненты — азот и кислород ( $M/Z = 7$ ,  $M/Z = 8$ ). В данной статье приведены данные только по ионам  $H^+$ ,  $He^+$ ,  $O^+$ ,  $N^+$ .

На рис. 1 представлены вариации концентраций ионов  $O^+$ ,  $N^+$ ,  $H^+$ ,  $He^+$ , полученные масс-спектрометром  $NAM-5$ , и данные по  $O^+$  и сумме легких ионов ( $H^+$  и  $He^+$ ), полученные прибором  $KM-6$ , 18.V.1990 г., а также показаны ход  $T_g$  и  $T_i$  вдоль орбиты по данным прибора  $KM-6$ .

Вольт-амперные характеристики, полученные прибором  $KM-6$  на этом витке, позволили уверенно разделить  $O^+$  и сумму легких ионов, что дало возможность провести абсолютную калибровку масс-спектрометра отдельно по диапазонам

легких и средних масс. Поскольку в области орбиты, где есть данные обоих приборов по легким ионам, концентрации ионов водорода, измеренные масс-спектрометром, существенно превышают концентрации гелия, то сумма концентраций легких ионов, измеренная КМ-6, практически соответствует концентрации ионов водорода. Данные рисунка относятся к долготам  $270+280^\circ$ , инвариантным широтам INLAT от  $-30^\circ$ , через экватор, до  $80^\circ$ , высотам  $H$  от 1500, через перигей (505 км) до 590 км, от 00.30 до 02.00 LT (ночь) соответственно. Примерно от широты  $60^\circ$  в сторону высоких широт высоты, где находится спутник, уже освещены солнцем.

Видно, что от высоты 900+1000 км до перигея преобладает ион атомарного кислорода. На высотах 1000+1500 км начинает преобладать  $H^+$ . Таким образом, высота перехода, где концентрация  $O^+$  равна концентрации  $H^+$  — примерно 1000 км и приходится на широты, близкие к геомагнитному экватору. Ход ионов атомарного азота вдоль орбиты примерно повторяет ход ионов  $O^+$ , и его концентрация относительно  $O^+$  меняется от 7 до 2%.

Вариации вдоль орбиты ионов  $He^+$  показывают значительный экваториальный провал в интервале  $\pm 25^\circ$  инвариантной широты. Провал для ионов водорода менее выражен и смещен к инвариантным широтам  $-15^\circ$ . В то же самое время отсутствует провал в ионах кислорода и азота.

Концентрации  $He^+$  уменьшаются в провале в 3 раза по сравнению с максимумом на средних широтах в северном полушарии и примерно на порядок — с максимумом в южном. Провал в концентрации гелия расположен в области высот 600—1100 км, где концентрация гелия должна расти с высотой, как малая ионная составляющая в условиях диффузионного равновесия. Концентрация  $He^+$  в зимнем (южном) полушарии больше, чем в летнем (северном) (так называемое зимнее вздутие гелия). Концентрации ионов гелия по отношению к концентрациям водорода изменяются от 1% на экваторе до 20—50% на средних широтах.

Как было показано в работе [12] по данным ионного состава на OGO-4, провал в концентрации  $He^+$  на экваторе изменяется в зависимости от величины угла  $\alpha$  между направлением Земля—Солнце и плоскостью магнитного экватора. Для больших  $\alpha$  (долгота Америки) он широкий и глубокий, и ярко выражена сезонная асимметрия (зимнее вздутие  $He^+$ ). Провал на американских долготах существует как днем, так и ночью [13].

Для условий, представленных на рис. 1, измерения относятся к американским долготам, что объясняет выраженный провал в  $He^+$ . Вариации ионов атомарного кислорода и азота от широты для высотного интервала 900—500 км, приведенные на рисунке в работе [12] по данным OGO-4, похожи на представленные здесь данные на витке 2886 в этом же интервале высот и широт. В работе [12] предполагается, что широтные профили ионов кислорода и азота являются плавными функциями высоты. Действительно (см. рис. 1), концентрации  $O^+$  и  $N^+$  растут с уменьшением высоты как в южном, так и в значительной части северного полушария.

Если взять только северное (летнее) полушарие и не рассматривать широты меньше  $30^\circ$  и больше  $60^\circ$  (области провалов в ионных концентрациях в спокойных геомагнитных условиях), то видно, что на средних широтах (параметр Мак — Илвайна  $L = 1,5+3$ ) в интервале высот 550+500 км концентрация ионов  $N^+$  падает с уменьшением высоты, т. е. шкала высоты для  $N^+$  меняет знак, что обычно происходит при переходе через максимум высотного распределения иона.

Таким образом, можно предположить, что в нашем случае максимум слоя в концентрации  $N^+$  лежит на высоте 550+570 км. Ход концентрации  $He^+$  в этом же интервале высот также позволяет предположить, что и распределение ионов гелия обусловлено изменением высоты. Сам максимум высотного распределения гелия расположен выше 600 км и маскируется низко-широтным провалом в концентрации  $He^+$ . Максимум высотного распределения ионов  $O^+$  по данным других экспериментов, как правило, примерно на 50 км ниже, чем  $N^+$  [14, 15],

поэтому вполне вероятно, что максимум сл

Так как с ростом частиц, и происхождением этого становится меридиональный в к экватору, что происходит. Этот дрейф концентраций ней (рекомбинация у количества плазмы  $F_2$  слой и поддерж

Таким образом, активности, в ноч Действительно, в 1 км. Однако это нес Солнца ( $F_{10,7} = 265$

В работе [16] от 200 до 450 км : днем ниже, чем на активности. Поскольку средних широтах, 450 км или нескол

Однако не искл вдоль орбиты — эт менениями параметр и молекул, скорос

Ионная и электр на витке 2886, пс удалось получить 1 ристик, поэтому н минимум 1900 К в (3000 К на инвари свидетельствует о лорода (рис. 1) от происходит с конц

Концентрация  $1$   $45^\circ$  равна  $6 \cdot 10^5$  с

На INLAT  $\approx 60^\circ$  резкой полярной ст концентрации. Ее формой, но с широт хода  $T_e$  на INLAT нагреву электроно тикорреляция  $N_e$  и  $T_e$ ) в значительной

Аналогичные с области на INLAT особенно в  $T_e$ . В примерно на 1000 пропорционален х

Знание электро родной атмосферы высотного градиен принять высотный мерений, 2 К/км,

где есть данные обоих  
орода, измеренные масс-  
гелия, то сумма концен-  
тствует концентрации  
270+280°, инвариантным  
сотам  $H$  от 1500, через  
(ночь) соответственно.  
высоты, где находится

обладает ион атомарного  
дать  $H^+$ . Таким образом,  
и  $H^+$  — примерно 1000 км  
ру. Ход ионов атомарного  
 $O^+$ , и его концентрация

тельный экваториальный  
вал для ионов водорода  
5°. В то же самое время

равнению с максимумом  
на порядок — с макси-  
ложен в области высот  
с высотой, как малая  
ссия. Концентрация  $He^+$   
ерном) (так называемое  
шению к концентрациям  
на средних широтах.

ого состава на OGO-4,  
зависимости от величины  
ю магнитного экватора.  
окий, и ярко выражена  
американских долготях

носятся к американским  
ации ионов атомарного  
0—500 км, приведенные  
а представленные здесь  
широт. В работе [12]  
ода и азота являются  
1), концентрации  $O^+$  и  
в значительной части

рассматривать широты  
центрациях в спокойных  
отах (параметр Мак —  
трация ионов  $N^+$  падает  
няет знак, что обычно  
пределения иона.

лучае максимум слоя в  
центрации  $He^+$  в этом  
и распределение ионов  
отного распределения  
широтным провалом в  
ионов  $O^+$  по данным  
ниже, чем  $N^+$  [14, 15],

поэтому вполне вероятно, что высотный пик в концентрации ионов кислорода, т. е. максимум слоя  $F_2$ , может располагаться около перигея.

Так как с ростом солнечной активности повышается температура нейтральных частиц, и происходит расширение («вздутие») атмосферы, то неизбежным следствием этого становится подъем максимума слоя  $F_2$  на большие высоты. Ночью меридиональный ветер меняет свое дневное направление к полюсу на направление к экватору, что приводит к появлению направленного вверх дрейфа заряженных частиц. Этот дрейф поднимает ионосферную плазму в область малых значений концентраций нейтральных молекул, где время жизни ионов увеличивается (рекомбинация уменьшается), что и обеспечивает сохранение значительного количества плазмы в течение всей ночи, т. е. дрейф плазмы вверх поднимает  $F_2$  слой и поддерживает  $N_1$  на достаточно высоком уровне.

Таким образом, самая большая высота слоя  $F_2$  будет в максимуме солнечной активности, в ночное время, и, может быть, его можно увидеть в перигее. Действительно, в концентрации ионов  $O^+$  виден максимум на высоте 500—520 км. Однако это необычно высокий максимум даже для такой высокой активности Солнца ( $F_{10,7} = 265$  единиц) в этот день.

В работе [16] показано, что высота максимума слоя  $F_2$  варьирует примерно от 200 до 450 км в течение цикла солнечной активности. Максимум находится днем ниже, чем ночью и на больших высотах во время повышенной солнечной активности. Поскольку данные для витка 2886 относятся к ночным условиям на средних широтах, летом, высота слоя должна находиться примерно на высоте 450 км или несколько выше для  $F_{10,7} = 265$  ед. (см. рис. 75 в работе [16]).

Однако не исключено, что изменение концентрации ионов кислорода и азота вдоль орбиты — это широтные вариации, вызванные, например, широтными изменениями параметров атмосферы (температуры, отношения концентраций атомов и молекул, скорости горизонтального ветра).

Ионная и электронная температуры, измеренные прибором КМ-6 вдоль орбиты на витке 2886, показаны на рис. 1. На этом витке в южном полушарии не удалось получить ионную температуру из имеющихся вольт-амперных характеристик, поэтому на рисунке она не показана. Электронная температура имеет минимум 1900 К вблизи магнитного экватора и увеличивается к высоким широтам (3000 К на инвариантной широте  $60^\circ$ ), несмотря на уменьшение высоты (что свидетельствует о большом широтном градиенте  $T_e$ ). Концентрация ионов кислорода (рис. 1) от широты  $45^\circ$  до  $60^\circ$  монотонно падает, точно так же как это происходит с концентрацией кислорода по данным масс-спектрометра.

Концентрация ионов  $O^+$  в полученном максимуме на инвариантной широте  $45^\circ$  равна  $6 \cdot 10^5$  см $^{-3}$  (ночь, лето).

На INLAT  $\approx 63^\circ$  отчетливо виден главный ионосферный провал (ГИП) с резкой полярной стенкой, плавным экваториальным склоном и узким минимумом концентрации. Ему соответствует субавроральный максимум  $T_e$  с аналогичной формой, но с широтной вариацией противоположного направления. Резкий излом хода  $T_e$  на INLAT  $60^\circ$  свидетельствует о том, что механизм, приводящий к нагреву электронов, проявляется в области широт INLAT  $> 60^\circ$ , а строгая антикорреляция  $N_1$  и  $T_e$  — о том, что механизм этих явлений (ГИП и максимум  $T_e$ ) в значительной степени связаны между собой.

Аналогичные структуры в  $N_1$  и в  $T_e$  зарегистрированы также в авроральной области на INLAT  $\approx 70^\circ$ . На INLAT  $\geq 63^\circ$  наблюдается увеличение флуктуаций, особенно в  $T_e$ . В обоих случаях изменения в  $T_e$  малы. На INLAT  $> 60^\circ$   $T_e$  примерно на 1000 К выше, чем на средних широтах, и ее ход приблизительно пропорционален ходу  $T_e$ .

Знание электронной и ионной температур позволило посчитать высоту однородной атмосферы ( $H$ ) для  $O^+$  в условиях диффузионного равновесия. Без учета высотного градиента температуры в районе высоты 600 км  $H = -244$  км. Если принять высотный градиент температуры, неизвестный непосредственно из измерений, 2 К/км, то  $H = -215$  км. Измеренная из профиля концентрации  $O^+$

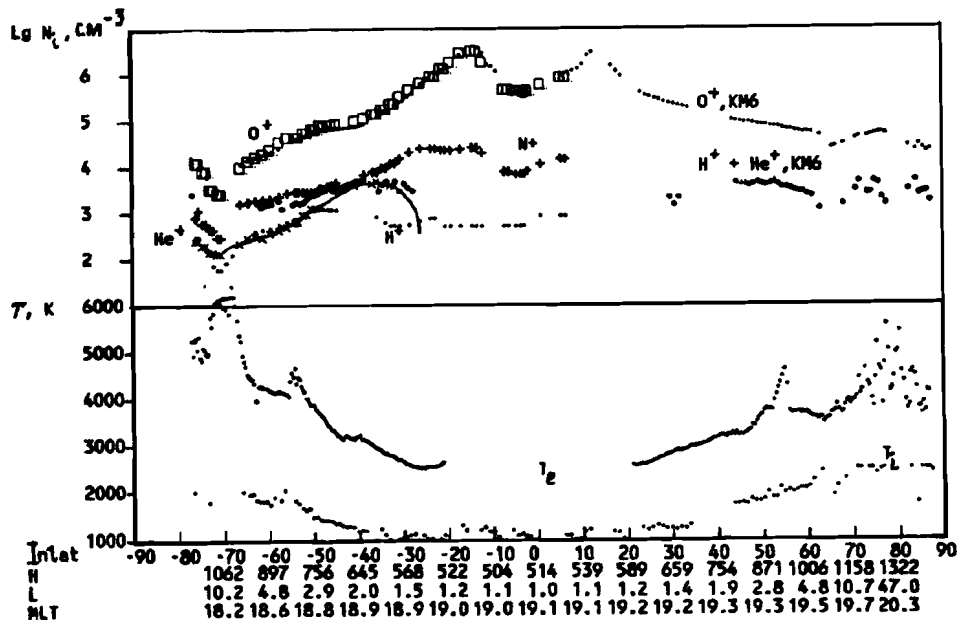


Рис. 2. Температуры  $T_e$ ,  $T_i$  и концентрации  $O^+$ , КМ6 и  $H^+ + He^+$ , КМ6 получены прибором КМ6, а концентрации ионов  $O^+$ ,  $H^+$ ,  $N^+$  и  $He^+$  — масс-спектрометром НАМ5 на витке 2146 19.III.1990 г. на высотах перигея. Долгота прохождения экватора  $274^\circ$

вдоль орбиты (считая его преимущественно высотным) высота однородной атмосферы в районе высот 550+600 км равна примерно —200 км, что хорошо согласуется с рассчитанной.

Температура ионов, оцененная по данным масс-спектрометра из отношения концентраций ионов азота и кислорода в районе высот 900—950 км, составляет около 1000 К. По данным КМ-6 в этом интервале высот она равна 1200+1300 К.

Для периода высокой солнечной активности (1979 г.) на спутнике ISS-B получены данные масс-спектрометра по ионному составу и анализатора с тормозящим потенциалом по ионным и электронным концентрациям и температурам для высоты 1100 км в разные сезоны и время суток [4]. Данные рис. 1 по концентрациям и температурам хорошо согласуются с результатами, полученными в аналогичных условиях (но усредненными за 3 месяца) на спутнике ISS-B.

В измерениях на спутнике ISS-B наблюдался минимум в широтном распределении  $T_e$  в районе магнитного экватора в ночные часы на высоте 1100 км. Его пространственные размеры примерно  $20^\circ$  по широте и  $100^\circ$  по долготе. Предполагается, что в период максимума солнечной активности механизм, приводящий к образованию провала, выражен в большей степени [17]. Летом экваториальный минимум  $T_e$  находится на долготах от  $300$  до  $40^\circ$ .

Приведенные на рис. 1 данные по электронной температуре в нашем эксперименте относятся к долготе  $270^\circ$ , что объясняет отсутствие выраженного провала в электронной температуре в районе экватора.

На рис. 2 представлены вариации ионного состава, полученные масс-спектрометром НАМ-5 и ионной ловушкой КМ-6 на витке 2146 19.III 1990 г. Показаны компоненты  $O^+$ ,  $N^+$ ,  $H^+$ ,  $He^+$ , измеренные масс-спектрометром в южной полусфере и концентрации  $O^+$  и сумма концентраций легких ионов  $H^+$  и  $He^+$ , измеренные ионной ловушкой в обеих полусферах. Видно хорошее соответствие формы орбитального хода концентрации  $O^+$ , полученного обоими приборами. В области  $30$ — $40^\circ$  инвариантных широт в южном полушарии концентрации гелия, измеренные масс-спектрометром, превышают концентрации водорода почти на порядок

величины, и су  
соответствовать  
спектрометра п

Высота вдом  
через перигей  
области, долгот  
спутника ионс

Видно, что  
максимальной  
(перигей). Мак  
ствие экватори  
после захода С  
геомагнитного  
ценных электр  
силовым линия  
которого относ  
ферном провал  
трации ионов п  
существенное в

Поскольку  
концентрация  $O^+$   
трации. Сопос  
частоты (электр  
дирования в ма  
африканской до  
18.00 и 20.00 L  
пересечения эк  
виден ГИП гл  
щийся в конце  
вечернем сектор  
 $T_e$  (рис. 2). Вели  
низких широт  
только по при  
полушарии, не  
блюдаются мак  
эффектов в вел  
источников нагр  
источников. Хо  
одинаковая их  
случае служит

На рис. 2 пр  
В измерения  
погрешность из-  
меняющего емк  
грешности мож  
больших  $3 \cdot 10^4$   
наблюдались оч  
этой области не

Несмотря на  
измерялась, по  
факт, что в об  
свидетельствует  
поэтому величин  
до высот 650 км

Первые изм



КМ6 получены прибором КМ6, а 15 на витке 2146 19.III.1990 г. на

м) высота однородной атмосферы — 200 км, что хорошо

спектрометра из отношения от 900—950 км, составляет от она равна 1200+1300 К. (1979 г.) на спутнике ISS-B катушку и анализатора с температурными датчиками [4]. Данные рис. 1 по результатам, полученными датчиками (температура) на спутнике ISS-B. Максимум в широтном распределении на высоте 1100 км. широте и 100° по долготе. активности механизм, пришедшей степени [17]. Летом от 300 до 40°.

температуре в нашем эксперименте выраженного провала

е, полученные масс-спектрометром в южной полусфере ионов H<sup>+</sup> и He<sup>+</sup>, измеренные в хорошем соответствии формами приборами. В области концентрации гелия, изморода почти на порядок

величины, и сумма концентраций легких ионов, измеренных ловушкой, должна соответствовать концентрации гелия, что позволило провести калибровку масс-спектрометра по He<sup>+</sup>.

Высота вдоль орбиты меняется от 1100 км в южной авроральной области через перигей 504 км вблизи экватора до 1300 км в северной авроральной области, долгота — от 60 до 20°, местное время — от 18 до 20 ч (на высотах спутника ионосфера освещена).

Видно, что преобладающим ионом на всех высотах является кислород с максимальной концентрацией в районе ± 15° инвариантной широты  $3 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$  (перигей). Максимумы, симметричные относительно магнитного экватора — следствие экваториальной аномалии, которая в течение дня и нескольких часов после захода Солнца создает максимумы  $N_p$ , располагающиеся на 10+30° от геомагнитного экватора. Аномалия вызывается подъемом плазмы вверх в скрепленных электрическом и магнитном полях и дальнейшей диффузией вниз по силовым линиям [18]. Этот эффект виден также в ионах азота, содержание которого относительно кислорода — от 2% в районе экватора до 16% в ионосферном провале. Сильнее всего экваториальный провал проявляется в концентрации ионов гелия, но на распределение ионов гелия в этом интервале высот существенное влияние оказывает и высотный ход.

Поскольку ионы кислорода преобладают на высотах в районе экватора, концентрация O<sup>+</sup> практически равна суммарной ионной (или электронной) концентрации. Сопоставляя наши данные с широтными зависимостями критической частоты (электронной концентрации), полученными на станциях наземного зондирования в марте для периода максимума солнечной активности (1958 г.) в африканской долготной зоне, видно, что именно в интервале времени между 18.00 и 20.00 LT геомагнитная аномалия наиболее развита [18]. Местное время пересечения экватора по нашим данным соответствует 19.00 LT. На рис. 2 также виден ГИП глубиной примерно порядка величины в концентрации, проявляющийся в концентрациях всех ионов на 70° южной инвариантной широты в вечернем секторе (18.00 MLT). В области провала наблюдается широкий максимум  $T_e$  (рис. 2). Величина  $T_e$  в максимуме 6500 К, а «фоновое» значение со стороны низких широт равно примерно 4000 К. В северном полушарии имеются данные только по прибору КМ-6. Значительных структур, подобных ГИП в южном полушарии, не зарегистрировано. В обоих полушариях на INLAT= 50+55° наблюдаются максимумы в  $T_e$ . Их расположение, а также отсутствие заметных эффектов в величинах концентраций свидетельствует об отсутствии локальных источников нагрева; ионосфера в этих случаях нагревается за счет плазмосферных источников. Хорошая магнитная сопряженность этих максимумов и примерно одинаковая их величина свидетельствуют, что источником энергии в данном случае служит кольцевой ток.

На рис. 2 представлены ионная и электронная температуры вдоль орбиты.

В измерениях электронной температуры высокочастотным зондом вносится погрешность из-за существования около внешнего электрода зонда слоя плазмы, меняющего емкость, что приводит к некоторому завышению  $T_e$ . Величина погрешности может быть существенной (больше 10—20%) для концентраций, больших  $3 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ . В связи с тем, что в районе экваториальной аномалии наблюдались очень высокие концентрации (больше  $10^6 \text{ см}^{-3}$ ), данные по  $T_e$  в этой области не приводятся до уточнения коэффициента коррекции.

Несмотря на то что в данном эксперименте температура нейтралов ( $T_n$ ) не измерялась, полученные данные позволяют сделать вывод о ее величине. Тот факт, что в области экваториальной аномалии  $T_i$  практически не изменяется, свидетельствует о том, что ионы очень эффективно охлаждаются нейтралами и поэтому величина  $T_n \approx T_i$ . Из хода  $T_i$  можно заключить, что по крайней мере до высот 650 км на широтах не более 30°  $T_i = T_n$ .

Первые измерения глобальной структуры F-области в  $N_p$  и  $T_e$  при очень



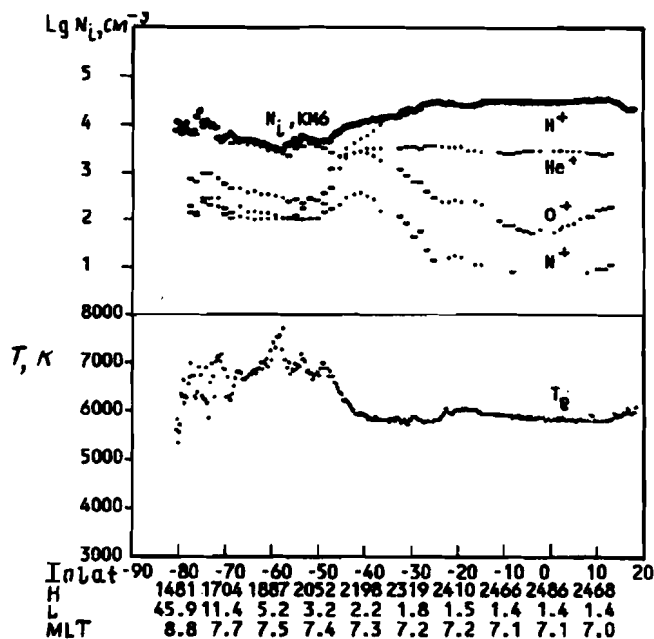


Рис. 3. Температура  $T_e$  и суммарная концентрация  $N_t$ , КМ6 получены прибором КМ6, а концентрации ионов  $O^+$ ,  $H^+$ ,  $N^+$  и  $He^+$  — масс-спектрометром НАМ5 на витке 2146 19.III.1990 г. на высотах апогея. Долгота прохождения экватора  $205^\circ$

высоких уровнях солнечной активности ( $F_{10.7} > 200$  ед.) были проведены зондом Ленгмюра на спутнике DE-2 [6]. К сожалению, нельзя провести детальное сравнение измерений из-за различий в орбитальных и геофизических условиях.

На рис. 3 представлены вариации концентраций ионов  $O^+$ ,  $H^+$ ,  $N^+$  и  $He^+$ , полученные масс-спектрометром на том же витке 2146, но для его апогейной части. Также показаны суммарная ионная концентрация, измеренная плоской ионной ловушкой, и электронная температура, измеренная высокочастотным зондом.

В области низких широт основной составляющей, существенно превышающей по концентрации другие ионы, является водород, и суммарная ионная концентрация практически равна концентрации  $H^+$ . На высоких широтах преобладают ионы кислорода, и суммарная ионная концентрация равна концентрации  $O^+$ .

Высота вдоль орбиты меняется от 1500 км в высоких широтах до 2500 км на экваторе, долгота от  $180$  до  $205^\circ$ , местное время от 05.00 до 07.30 (атмосфера освещена).

Видно характерное для больших высот уменьшение с широтой концентрации легких ионов и увеличение ионов  $O^+$  и  $N^+$ . На низких широтах концентрация ионов водорода не меняется с широтой от  $+20$  до  $-25^\circ$  и составляет  $(2+3) \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ . Также постоянна по широте концентрация ионов гелия ( $2 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ ) вплоть до инвариантной широты  $-40^\circ$ , где концентрации гелия и водорода становятся близки. В орбитальном ходе концентраций обоих ионов отсутствует экваториальный провал, что объяснимо для периода равноденствия и данного долготного сектора [13].

Примерно после  $-45^\circ$  инвариантной широты начинается провал в концентрациях легких ионов, достигая минимальных концентраций на широтах  $-50 \dots -60^\circ$ . В провале концентрации  $H^+$  и  $He^+$  становятся сравнимыми по величине. Провал в концентрациях  $O^+$  и  $N^+$  практически не выражен.

Для  
уровень,  
эксперим  
дается за  
в районе  
широтах)  
1200+140  
широтах  
увеличив  
Плане  
 $H^+$  спада  
 $40+45^\circ$  м  
Ото д  
на 1000  
вариация  
Повед  
одновремен  
ности для  
что пони  
суточным  
кислорода  
нитных с  
перехода.  
высоты у  
в стацион  
рименте  
1000 км  
на установ  
масс-спек  
величины  
900 км на  
к условия  
Расчет  
полученн  
работе [2  
перехода.  
май 1965  
летний д  
Сами вел  
в максим  
Алуэтте-  
Такой же  
ISIS-2 и  
широтах  
широтах  
нике «И  
рименте  
наблюден  
пока воз  
как это с  
вариация  
Завис  
[21]. По  
спутника

## Уровень перехода ( $n(O^+) = n(H^+)$ )

Для исследования ионосферно-плазмосферных связей важную роль играет уровень, где  $n(O^+) = n(H^+)$ , так называемый уровень перехода  $H_x$ . В данном эксперименте этот уровень получен по измерениям масс-спектрометра. Наблюдается зависимость уровня  $H_x$  от широты. Днем он изменялся от 1300+1400 км в районе экватора до 2400+2500 км на широтах магнитного склонения (магнитных широтах) 40+45°. Ночью уровень менялся от 900+1000 км в районе экватора до 1200+1400 км в районе 40+45° и 2400 км на магнитных широтах 50+55°. На широтах 20—30° он уменьшался до 750 км. Таким образом, уровень перехода увеличивался от низких широт к высоким как днем, так и ночью.

Планетарное распределение  $O^+$  и  $H^+$  таково (см. рис. 3), что концентрация  $H^+$  спадает, а кислорода возрастает к высоким широтам, начиная примерно с 40+45° магнитной широты, что приводит к возрастанию уровня перехода.

От дня к ночи уровень менялся на 400 км в районе экватора и в среднем на 1000 км на средних широтах, что говорит о более значительных суточных вариациях по направлению к высоким широтам.

Поведение уровня перехода  $O^+ - H^+$  в течение суток исследовалось при одновременном решении уравнения сохранения энергии и уравнения непрерывности для  $H^+$  и  $O^+$  в работе [19]. Расчет такого стационарного случая показал, что понижение уровня перехода ночью в средних широтах в основном вызывается суточными вариациями электронной температуры и концентрации нейтрального кислорода. В работе [20] показано, что наличие потоков  $H^+$  и  $O^+$  вдоль геомагнитных силовых линий должно увеличивать величину суточных вариаций уровня перехода. Расчет для динамических условий на низких широтах дает уменьшение высоты уровня перехода ночью по сравнению с днем, равное 500 км, тогда как в стационарных условиях это уменьшение равно 250 км [20]. В нашем эксперименте разница в 400 км между условиями ночи и дня на низких широтах и 1000 км на средних говорит о существенном влиянии динамических процессов на установление уровня перехода. Такие же выводы сделаны по результатам масс-спектрометрического эксперимента на спутнике Explorer-32 [20]. Сами величины уровня перехода днем и ночью на средних широтах (2000 км днем и 900 км ночью) были меньше, чем в эксперименте «Активный», так как относятся к условиям меньшей солнечной активности (1966 г.).

Расчет высоты уровня перехода по профилям электронной концентрации, полученным методом зондирования сверху на спутнике Алуэтт-1, проделан в работе [21]. Представлены суточные, широтные и сезонные зависимости уровня перехода. Данные относятся к минимуму солнечной активности (октябрь 1962 г.— май 1965 г.). Высота перехода изменяется от 500 км в зимнюю ночь до 850 км в летний день, резко увеличиваясь к геомагнитным широтам 50—60° до 1200 км. Сами величины опять значительно меньше полученных на «Интеркосмосе-24» в максимуме солнечной активности. В ночных условиях в эксперименте на Алуэтте-1 наблюдается уменьшение уровня в районе  $\pm 30^\circ$  геомагнитной широты. Такой же эффект виден и по масс-спектрометрическим измерениям на спутнике ISIS-2 и вызывается увеличением  $O^+$  на экваторе по сравнению с геомагнитными широтами  $\pm 30^\circ$ . Тенденция к уменьшению уровня перехода ночью на этих же широтах наблюдается и по данным масс-спектрометрических измерений на спутнике «Интеркосмос-24». Другой причиной такого уменьшения в нашем эксперименте может быть меньшая величина индекса солнечной активности во время наблюдений на этих широтах. Количество данных по уровню перехода не дало пока возможности исследовать подробно его поведение в течение ночных часов, как это сделано в работе [22], корреляцию уровня с  $K_p$ -индексом, его долготные вариации.

Зависимости уровня перехода от солнечной активности исследовались в работе [21]. Показано, что уровень растет с увеличением активности. По результатам спутника ISIS = 1 ( $F_{10.7} = 150$  ед.) ночью на низких широтах он равен 1100 км,

а для  $F_{10.7} = 112$  ед.— только 750 км (данные ISIS-2). Ранее было показано, что уровни перехода в эксперименте «Активный» значительно выше измеренных в экспериментах при низкой активности Солнца.

Для периода высокой солнечной активности (1979 г.,  $F_{10.7} = 180$  ед.) получены данные ионного масс-спектрометра на спутнике ISS-B и представлены в виде относительных концентраций ионов в зависимости от времени суток в работе [3]. Результаты относятся к постоянной высоте 1100 км, периоду летнего и зимнего солнцестояния, к азиатской зоне.

Из анализа данных можно сделать вывод о поведении уровня перехода. На средних широтах ( $40^\circ$  геомагнитной широты) ночью (02.00 LT), летом он равен 1100 км, что не противоречит результатам, полученным на спутнике «Интеркосмос-24». Из поведения относительных концентраций в течение суток в период декабрьского солнцестояния видно, что на средних широтах уровень перехода выше днем, чем ночью, что наблюдается обычно в других экспериментах при низкой и средней солнечной активности [21]. Однако на экваториальных широтах он значительно выше ночью, чем днем, причем абсолютная величина концентрации  $O^+$  не изменяется, оставаясь на дневном уровне, а концентрация  $H^+$  уменьшается. В эксперименте «Активный» дневные уровни выше ночных, но обработанные данные в области экватора относятся к периоду летнего солнцестояния, что не дает возможности проверить эту аномалию поведения уровня перехода, проявляющуюся только во время зимнего солнцестояния.

### Ионы гелия в период высокой солнечной активности

Поскольку гелий — одна из важных составляющих верхней атмосферы, большое внимание в литературе уделялось теоретическому и экспериментальному изучению вариаций содержания  $He^+$  относительно  $H^+$ . В ранних моделях ионосферы предполагалось, что в период максимальной солнечной активности из-за увеличения температуры в ионосфере должен образовываться слой доминирующих ионов  $He^+$  [12].

Прямые и косвенные измерения водорода и гелия в области высот 1000 км во время 19 цикла солнечной активности проводились редко, что не позволило сделать окончательные выводы о распределении легких ионов. Во второй половине солнечного цикла 19 с помощью в основном ионных ловушек было обнаружено преобладание ионов гелия во внешней ионосфере [2, 12]. Высота и толщина слоя гелия, естественно, зависят от времени суток, сезона, широты, уровня солнечной активности и т. п.

Во время 20 солнечного цикла слой гелия не был обнаружен ни одним из методов в том числе и масс-спектрометрическим, по крайней мере, на низких и средних широтах [12]. На высоких широтах на спаде 20 цикла масс-спектрометрами на спутниках OGO-6, ISIS-2, AE-D зарегистрировано преобладание гелия в узком интервале широт (около  $10^\circ$ ) только при определенных условиях освещения атмосферы Солнцем (местное время, сезон) [23, 24].

В 21 цикле солнечной активности во время его максимума по масс-спектрометрическим данным спутника ISS-B ионы гелия не всегда были малой составляющей [3]. Ночью во время декабрьского солнцестояния наблюдалось преобладание  $He^+$  (от 50 до 70%) на геомагнитных широтах 20, 30 и  $40^\circ$ , т. е. в зимнем полушарии. Во время июньского солнцестояния в зимнем полушарии такого явно выраженного эффекта не наблюдалось. Активность солнца в период эксперимента  $F_{10.7} = 180$  единиц.

В эксперименте «Активный» равные концентрации  $H^+$  и  $He^+$  вплоть до некоторого превышения концентраций  $He^+$  над  $H^+$  и  $O^+$  наблюдались на экваториальной стенке провала в легких ионах ( $L = 3+4$ ), а значительное преобладание  $He^+$  было на высоких широтах в области высокоширотного провала, так называемого «hole» (как в эксперименте на AE-D [23]), для зенитных углов больших

100°,  
на вс  
[24],  
поля,  
В  
и 100  
«Актив  
На  
ример  
2000+  
(как

В с  
ионов  
темпе  
Даннь  
стотны  
актив  
конце

В с  
освеще  
летом  
лагает  
 $6 \cdot 10^6$   
состав  
K и 13  
высота  
6000+7

На  
 $H^+$ , его  
В э  
максим  
Пол  
изменя  
широта  
область

Равн  
в легки  
над  $H^+$   
на поря  
(на инв  
слой He  
и т. п.

В ук  
экватор  
провале  
предмет

1. Bilitta  
Res. 1
2. Бреус 1  
СССР,

100°, когда верхняя часть силовых линий освещена. Однако это наблюдается не на всех витках в одном и том же секторе местного времени. Как предполагается [24], это может быть вызвано различной ориентацией межпланетного магнитного поля, а значит, и разным характером конвекции.

В работе [23] указывалось, что  $\text{He}^+$  в высокоширотном провале между 500 и 1000 км доминирует исключительно для условий равнодействия. В эксперименте «Активный» это наблюдается на высотах около 2000 км в период солнцестояния.

На средних широтах, ночью, во время декабрьского солнцестояния в эксперименте «Активный» не наблюдался слой  $\text{He}^+$ , по крайней мере, на высотах 2000+2400 км. К сожалению, для указанных условий на высотах около 1100 км (как на ISS-B) в эксперименте «Активный» данные отсутствуют.

### Заключение

В статье представлены данные по абсолютным и относительным концентрациям ионов  $\text{O}^+$ ,  $\text{N}^+$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{He}^+$ , суммарной ионной концентрации, электронной и ионной температурам в интервале высот 500+2500 км в спокойных геомагнитных условиях. Данные получены масс-спектрометром, плоской ионной ловушкой и высокочастотным зондом на спутнике «Интеркосмос-24» в период максимума солнечной активности 22 цикла. Показано, что в этот период наблюдались повышенные концентрации и температуры.

В области перигея (500+560 км), где преобладают ионы  $\text{O}^+$ , концентрация в освещенное время суток на широтах  $\pm 35^\circ$  достигала  $(1+3) \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ . Ночью летом на средних широтах высота максимума в концентрации  $\text{O}^+$ , как предполагается, могла достигать 500—520 км. Концентрация в максимуме была равна  $6 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ . Величины температур на этих высотах днем на низких широтах составляют  $T_e \approx 2500+3000 \text{ K}$ ,  $T_i \approx 1000+1300 \text{ K}$ , на средних широтах 3000+3500 K и 1300+1700 K соответственно. В области главного ионосферного провала на высотах порядка 1000 км электронная температура часто поднимается до 6000+7000 K.

На высотах апогея (2400+2500 км) в области низких широт, где преобладает  $\text{H}^+$ , его концентрация составляет  $(2+3) \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ , а  $T_e$  — около 6000 K.

В экваториальной области часто ярко выражена геомагнитная аномалия с максимумами в  $N_e$  примерно на  $\pm 15^\circ$  инвариантной широты.

Получен высокий уровень перехода от концентраций  $\text{O}^+$  к  $\text{H}^+$ . Днем он изменялся от 1300+1400 км в районе экватора до 2400+2500 км на магнитных широтах  $40+45^\circ$ , а ночью от 900+1000 км до 1200+1400 км в этих же широтных областях.

Равные концентрации  $\text{He}^+$  и  $\text{H}^+$  наблюдались на экваториальной стенке провала в легких ионах ( $L = 3+4$ ) вплоть до некоторого превышения концентрации  $\text{He}^+$  над  $\text{H}^+$  и  $\text{O}^+$  в этой широтной области. Наблюдалось значительное (больше чем на порядок величины) преобладание гелия в области высокоширотного провала (на инвариантных широтах больше  $70^\circ$ ). Для того, чтобы появился заметный слой  $\text{He}^+$ , необходимо сочетание определенных условий освещения, сезона, высот и т. п.

В указанный период времени регистрация таких интересных явлений, как экваториальная аномалия в концентрации, преобладание  $\text{He}^+$  в высокоширотном провале, происходила довольно часто. Детальное их описание и анализ будут предметом дальнейших статей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bilitza D.* Empirical modeling of ion composition in the middle and topside ionosphere//Adv. Space Res. 1990. V. 10. № 11. P. 47.
2. *Бреус Т. К.* Ионы гелия в ионосфере: Препринт № 7365-120. М.: Радиотехнический ин-т АН СССР, 1965.

3. *Goel M. K. and Rao B. C. N.* Ion composition behaviour in low and mid-latitudes during high solar activity//*Adv. Space Res.* 1984. V. 4. № 1. P. 111—117.
4. Worldwide Maps of Electron Density and Temperatures. Mean Ion Mass. Ion Temperature and Ion Composition Obtained from Ionosphere Sounding Satellite — b Observations. August 1978 to April 1980//*Commun. Res. Laborator. Tokyo, Japan*, 1981.
5. *Newberry I. T., Comfort R. H., Richards P. G. and Chappell C. R.* Thermal He<sup>+</sup> in the plasmasphere: Comparison of observation with numerical calculations//*J. Geophys. Res.* 1989. V. 94. № A11. P. 15.265—15.276.
6. *Brace L. H., Theis R. F., Hoehy W. R.* A global view of F-region electron density and temperature at solar maximum//*Geophys. Research Letters*. 1982. V. 9. № 9. P. 989—992.
7. Информация об основных научных результатах международных проектов, реализованных в 1989 г.//Информационный бюллетень 21. Москва, 1991. С. 35—37.
8. *Кочнев В. А., Барзилович Ю. П., Гречнев К. В. и др.* Радиочастотный масс-анализатор повышенной чувствительности для исследования верхних атмосфер Земли и планет: Препринт № 332. М.: ИКИ АН СССР, 1977.
9. *Афонин В. В., Смирнова Н. Ф.* Оптимизация комплексного эксперимента по измерению параметров холодной плазмы: Препринт № 1608. М.: ИКИ АН СССР, 1990.
10. *Афонин В. В., Гдалевич Г. Л., Грингауз К. И., Кайнарова Я., Шмилауэр Я.* Исследования ионосферы, проведенные при помощи спутника «Интеркосмос-2»//*Космич. исслед.* 1973. Т. 11. № 2. С. 254—266.
11. *Кубат К., Класс Я., Шмилауэр Я., Афонин В. В.* Аппаратура для исследования внешней ионосферы. М.: ИЗМИРАН СССР, 1980. С. 120.
12. *Тейлор Г. А., мл., Мейр Х. Дж., Бринтон Г. К.* Исследование ионов водорода и гелия в период увеличения солнечной активности.//*Масс-спектрометрия верхней атмосферы Земли.* Л.: Гидрометеоиздат, 1972. С. 127—145.
13. *Breig E. L., Hoffman J. H.* Variations in ion composition at middle and low latitudes from Isis 2 satellite//*J. Geophys. Res.* 1975. V. 80. № 16. P. 2207—2216.
14. *Ершова В. А., Гречнев К. В., Шмилауэр Я.* Исследование состава положительных ионов на ракете «Вертикаль-6» методом масс-спектрометрии//*Ракетное зондирование верхней атмосферы и ионосферы.* Ростов-на-Дону: Ростовский университет, 1989. С. 68—74.
15. *Шульчишин Ю. А.* Исследование состава положительных ионов на ракете «Вертикаль-10»//*Ракетное зондирование верхней атмосферы и ионосферы.* Ростов-на-Дону: Ростовский университет. 1989. С. 117—128.
16. *Бауэр Э.* Физика планетных ионосфер. М.: Мир, 1976. С. 211.
17. *Sagava E., Miyazaki S., Mori H., Ogawa T.* Night-time electron temperature through in the equatorial topside ionosphere revealed from RPA experiments on the ISS-b satellite//*J. Atmosph. Terr. Phys.* 1983. V. 43. № 11. P. 1165—1173.
18. *Walke G. O.* Longitudinal structure of the F-region equatorial anomaly — a review//*J. Atmos. Terr. Phys.* 1981. V. 43. № 8. P. 763—774.
19. *Mayr H. G., Brace L. H. and Dunham G. S.* Ion composition and temperature in the topside ionosphere//*J. Geophys. Res.* 1967. V. 72. № 17. P. 4391—4404.
20. *Бринтон Г. К., Пикет Р. А., Тейлор Г. А. мл.* Суточные и сезонные вариации ионного состава атмосферы и его корреляция с зенитным углом Солнца.//*Масс-спектрометрия верхней атмосферы Земли.* Л.: Гидрометеоиздат, 1972. С. 164—178.
21. *Titheridge J. E.* Ion transition heights from topside electron density profiles//*Planet. Space Sci.* 1976. V. 24. P. 229—245.
22. *Serafimov K. V., Dachev T. P., Kutiev I. S. et al.* Temporal and latitudinal variations of O<sup>+</sup> and H<sup>+</sup> transitions levels obtained by Intercosmos-2 satellite data//*Indian J. Radio Space Phys.* 1978. V. 4. P. 293.
23. *Heelis R. A., Murphy J. A., and Hanson W. B.* A feature of the behaviour of He<sup>+</sup> in the nightside high-latitude ionosphere during equinox//*J. Geophys. Res.* 1981. V. 86. № A1. P. 59—64.
24. *Quegan S., Bailey G. J., Moffett R. J.* Regions of He<sup>+</sup> dominance in the high-latitude topside ionosphere//*Planet. Space Sci.* 1984. V. 32. № 7. P. 791—802.

Поступила в редакцию  
10.01.1993