

УДК 550.385.41

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

**ДОМИНИРОВАНИЕ ИОНОВ ГЕЛИЯ В ПЕРИОД РАВНОДЕНСТВИЯ  
НА НИЗКИХ И СРЕДНИХ ШИРОТАХ В 22 ЦИКЛЕ СОЛНЕЧНОЙ  
АКТИВНОСТИ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА СПУТНИКЕ  
«ИНТЕРКОСМОС-24»**

*Институт космических исследований РАН  
Институт атмосферной физики Чешской АИ*

Приводятся результаты измерения  $\text{He}^+$  двумя независимыми методами: масс-спектрометрическим и зондовым на спутнике «Интеркосмос-24» (приборы НАМ-5 и КМ-6). Обнаружены устойчивое доминирование ионов гелия и его высокая абсолютная концентрация, достигающая до  $3,5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$  на низких и средних широтах в обоих полушариях, в широкой высотной области, в целом от 700 до 2500 км, в период весеннего равноденствия 1991 г. в конце трехлетнего периода около максимума 22 цикла солнечной активности. Такое абсолютное преобладание ионов гелия в широком долготном высотно-широтном диапазоне в период равноденствия по существу впервые показано прямыми измерениями масс-спектрометрическим методом. Обнаружено, что это явление связано со знаком склонения, а именно: это происходит при положительном склонении. Сделан вывод о влиянии динамических процессов на доминирование  $\text{He}^+$ . Приводится карта высотно-широтного распределения появления доминирующего  $\text{He}^+$ . Прослежен материал экспериментальных и теоретических работ, дающий общее представление о поведении  $\text{He}^+$  на протяжении четырех последних циклов солнечной активности.

Yu. A. Shultchishin, V. V. Afonin, K. V. Grechnev, V. A. Ershova, V. A. Kochnev, O. Z. Roste, N. F. Smirnova, J. Shmilauer. Helium ions predominance at low and middle latitudes during equinox at 22 solar activity cycle from the observations aboard the «Intercosmos-24» satellite.  $\text{He}^+$  measurements by two independent methods (mass-spectrometric and probe) aboard of «Intercosmos-24» satellite are presented. The steady  $\text{He}^+$  dominance and its high absolute density up to  $3,5 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-3}$  at low and middle latitudes of both hemispheres in wide height range intervals between 700 and 2500 km during the spring equinox of 1991 at the end of three years period of maximum of the 22-nd solar activity cycle was observed. Such absolute dominance of helium ions in wide longitude-height-latitude range during equinox in measurements by mass-spectrometric methods was shown practically for the first time. It was demonstrated that the  $\text{He}^+$  dominance is associated with declination sign. The conclusion about influence dynamical processes on  $\text{He}^+$  dominance was made. Map of height-latitude distribution of  $\text{He}^+$  dominance appearance is presented. The experimental and theoretical works available from literature relating to  $\text{He}^+$  behavior during the last four solar activity cycles was analysed.

Проблема содержания ионов гелия в верхней ионосфере обсуждается давно. Впервые на важную роль ионов гелия в верхней атмосфере указал Николе [1]. Однако еще в течение десятилетий ввиду недостаточной экспериментальной базы

ионам гелия в моделях ионосферы отводилась роль малого компонента, и его концентрация учитывалась на уровне 10% от общей концентрации. После статьи Николе появились работы с описанием экспериментальных данных, свидетельствующих о преобладании ионов гелия в ионосфере [2—4], эти данные получены ионными ловушками в 1960 и 1962 гг. В масс-спектрометрическом эксперименте 1961 г. концентрации  $\text{He}^+$  превышали концентрацию  $\text{H}^+$ , однако при этом доминирующим ионом оставался  $\text{O}^+$  [4—5]. Тогда же появились теоретические работы по проблеме  $\text{He}^+$ . Обобщенный обзор экспериментальных и теоретических работ по проблеме  $\text{He}^+$  с 1958 по 1964 гг. сделан в работе [6]. В работе Тейлора и др. [7] также приводится обзор некоторых результатов зондовых и масс-спектрометрических экспериментов. Были отмечены случаи превышения концентрации  $\text{He}^+$  только над концентрацией  $\text{H}^+$ , а также доминирования ионов гелия по зондовым измерениям. Из рисунка 12 той же работы, суммирующего эти эксперименты на кривой солнечной активности, видно, что все эти случаи относятся к периоду спада солнечной активности 19-го цикла (максимальная активность в числах Вольфа  $R = 190$  в 1957 г.).

Во время 20-го солнечного цикла (в максимуме активности в 1968 г.  $R = 105,9$ , что значительно ниже, чем в предыдущем цикле) преобладание ионов гелия над всеми ионными компонентами по литературным данным не было обнаружено ни одним из методов, в том числе и масс-спектрометрическим. Однако в работе [8] показано, что с увеличением солнечной активности концентрации  $\text{H}^+$  уменьшаются, а концентрации  $\text{He}^+$  на высотах выше 800 км увеличиваются.

В 21-м цикле солнечной активности во время его максимума ( $R = 155,4$  в 1979 г.), по масс-спектрометрическим данным со спутника ISS-B, ночью во время декабрьского солнцестояния наблюдалось содержание  $\text{He}^+$  от 50 до 70% на высоте 1100 км на геомагнитных широтах 20, 30 и 40° в зимнем полушарии, в Азиатской зоне [9]. В 1981 г., по данным сферической ионной ловушки со спутника «Интеркосмос—Болгария-1300», отношение  $n(\text{He}^+)/n(\text{O}^+)$  на средних широтах на высотах ~ 850 км достигало 1,65 для условий ночи, равноденствия и высокой солнечной активности [10]. Однако концентрации  $\text{H}^+$  оставались неопределенными. Также в 1981 г. наблюдения состава ионосферы анализатором с тормозящим потенциалом на спутнике DE-2 в среднеширотной ионосфере на долготе  $-150^\circ$  и высоте ~ 900 км ночью в равноденствие показали абсолютное доминирование  $\text{He}^+$ . Возможность такой ситуации показана теоретически [11].

Несмотря на большое количество экспериментальных данных по ионному составу верхней атмосферы на протяжении последних четырех циклов солнечной активности, проследить поведение  $\text{He}^+$  на всех фазах цикла солнечной активности сложно. Хорошо представлен только 20-й цикл, максимум которого был ниже остальных.

Данная работа посвящается результатам измерения  $\text{He}^+$  двумя независимыми методами: масс-спектрометрическим и зондовым на спутнике «Интеркосмос-24». Результаты подтверждают устойчивое преобладание ионов гелия и его высокую (рекордную в сравнении с 21 циклом солнечной активности [10, 11]) абсолютную концентрацию до  $3,5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$  на низких и средних широтах в обоих полушариях, в широком высотном интервале на различных его участках, в целом от 700 до 2500 км, в период весеннего равноденствия 1991 г., в конце периода максимума 22 цикла солнечной активности (максимальная активность  $R = 157,6$  в 1989 г.). Мы надеемся, что наши экспериментальные данные смогут дополнить все еще довольно скудную информацию об условиях доминирования  $\text{He}^+$ .

#### Условия проведения эксперимента

Аппаратура и основные характеристики масс-спектрометрического прибора НАМ-5 (радиочастотный анализатор беннетовского типа) и зондового К-6, состоящего из плоской ионной ловушки (анализатора с тормозящим потенциалом) для измерения температуры и концентрации ионов и высокочастотного зонда для

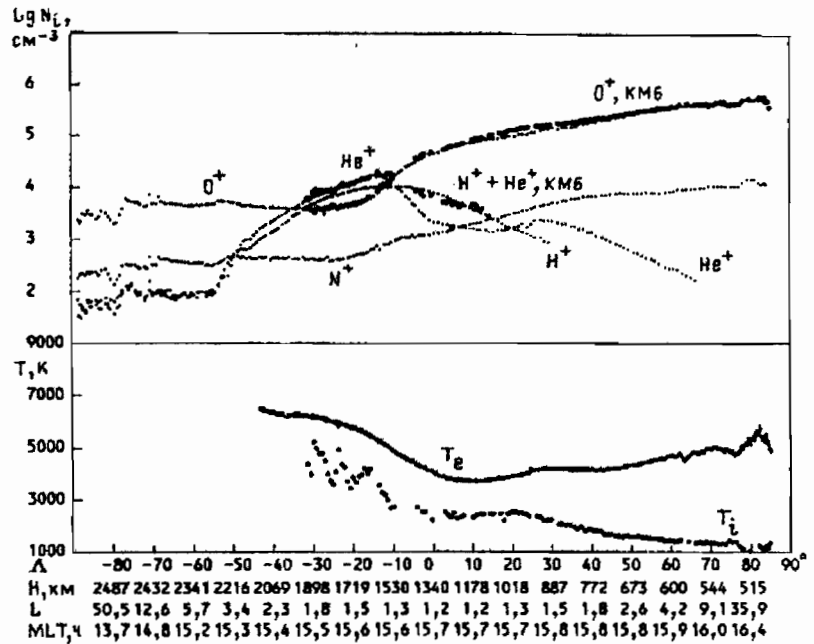


Рис. 1. Концентрации основных ионов и электронная и ионная температуры, полученные приборами ПАМ-5 и КМ-6 на витках 6674—6675 дием в период равноденствия  
 $\Lambda$  — инвариантная широта,  $H$  — высота,  $L$  — параметр Мак-Илвайна,  $MLT$  — магнитное местное время; точки — данные масс-спектрометра, жирные точки — плоской ловушки. Долгота прохождения экватора  $267^\circ$ . Область преобладания  $\text{He}^+$  от  $-13$  до  $-29^\circ$  инвариантной широты

измерения электронной температуры, а также калибровка данных масс-спектрометра к абсолютным концентрациям достаточно хорошо описаны в [12]. Спутник имеет трехосную стабилизацию, ось  $X$  направлена по вектору скорости. Наклонение орбиты составляло  $82^\circ$ , период обращения вокруг Земли — 1 ч 56 мин. Эволюция орбиты спутника за полуторамесячный период характеризовалась следующими параметрами. На 27.II.1991 г., когда еще не наблюдалось доминирования  $\text{He}^+$ , местное время пересечения спутником плоскости геомагнитного экватора составляло 06.00 и 18.00  $MLT$ , апогей ( $\sim 2500$  км) находился на  $57^\circ$  с. ш., а перигей ( $\sim 500$  км) на  $60^\circ$  ю. ш. (географические координаты). 15.IV.1991 г. соответствующие параметры были следующими: местное время 01.00 и 13.00  $MLT$ , апогей — на  $16^\circ$  с. ш., перигей — на  $17^\circ$  ю. ш. Максимальная активность Солнца в марте 1991 г. достигла  $R = 202$  (16.III), а в апреле  $R = 227$  (12 и 15.IV). Представляемые нами данные относятся к магнитоспокойным условиям, хотя геомагнитные бури за рассматриваемый период наблюдались достаточно часто.

### Результаты и их обсуждение

Наши предыдущие наблюдения преобладания  $\text{He}^+$  над остальными компонентами верхней ионосферы относились в основном к полярной области, так называемому «hole», и к экваториальному склону провала в легких ионах ( $L = 3 \div 4$ ) и были описаны в работе [12]. В данной статье рассматриваются низкие и средние широты. Увеличение абсолютной концентрации  $\text{He}^+$  вплоть до величины  $10^4 \text{ см}^{-3}$  отмечалось в нашем эксперименте еще и в декабрьское солнцестояние 1990—1991 гг., но приводило лишь к заметному преобладанию  $\text{He}^+$  либо над  $\text{H}^+$ , либо над  $\text{O}^+$ . Однако полного преобладания ионов гелия над всеми компо-

нентами не наблюдалось до марта 1991 г. В полной мере отметить точные временные границы появления доминирующего  $\text{He}^+$  невозможно из-за условий работы телеметрии и большой эволюции орбиты, как отмечалось выше.

В марте — апреле 1991 г. достаточно часто использовался многовитковый режим записи телеметрии, что позволило увидеть меняющуюся картину долготного распределения основных ионов в более, чем месячный период.

Для дальнейшего анализа ситуации с доминирующим  $\text{He}^+$  все витки разделены на две группы полувитков в соответствии с местным магнитным временем. Одна группа попадает в сектор день — вечер (12.00—18.00 MLT), где орбита спутника полностью освещена, а другая в сектор ночь — утро (00.00—06.00 MLT), где может быть освещена часть орбиты.

На рис. 1 показано распределение основных ионов  $\text{O}^+$ ,  $\text{N}^+$ ,  $\text{H}^+$  и  $\text{He}^+$  по инвариантной широте на половине витков 6674 ÷ 6675 для сектора день — вечер (15.40 MLT), 18.III.1991 г., время от 21.25 до 22.24 UT, индекс  $K_p = 0$ . Из рисунка видно, что  $\text{O}^+$  преобладает почти на всем витке, его концентрация плавно понижается с ростом высоты от высоких к низким широтам в северном полушарии и падает почти на порядок величины в области инвариантных широт от  $-10^\circ$  до  $-30^\circ$ , и далее это значение концентрации сохраняется, слегка увеличиваясь к высоким южным широтам. Концентрация  $\text{H}^+$  увеличивается до  $30^\circ$  инвариантной широты до своего максимального значения на  $-10^\circ$ , не испытывая экваториального провала, и затем уменьшается в направлении провала в легких ионах на  $-55^\circ$ . В поведении  $\text{He}^+$  видна сильная асимметрия в величине концентрации для обоих полушарий и значительный экваториальный провал, также несимметричный относительно геомагнитного экватора со смещением в северное полушарие, при уменьшении концентрации в провале более чем на порядок. Максимального значения  $1,5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$  концентрация  $\text{He}^+$  достигает на  $-13^\circ$ , и  $\text{He}^+$  становится доминирующим ионом вплоть до  $-29^\circ$  инвариантной широты. Этой области широт соответствуют высоты 1600—1850 км. Поведение  $\text{N}^+$  почти повторяет поведение  $\text{O}^+$ , однако обращает на себя внимание следующая особенность. На южных приэкваториальных широтах, где  $\text{O}^+$  испытывает резкое уменьшение, а  $\text{He}^+$  — увеличение концентрации, появляется небольшой максимум в концентрации  $\text{N}^+$  на фоне ее плавного уменьшения. В области преобладания  $\text{He}^+$  электронная и ионная температуры значительно возрастают, достигая величины около 6000 и 5000 К соответственно.

Случаев доминирования ионов гелия в секторе день — вечер немного и все они относятся к южному полушарию и узкому долготному поясу от  $245^\circ$  до  $290^\circ$ , что говорит о сильно выраженной долготной зависимости для данного геомагнитного сезона и местного времени. Они наблюдались с 7 по 18.III для местного времени от 15.40 до 16.44 MLT. Приведенный рисунок показывает, что наибольшее превышение ионов гелия над остальными компонентами достигает 1,6 раза. В целом области доминирования ионов гелия наблюдаются в это время на высотах от 1500 до 2100 км, в области инвариантных широт от  $-5^\circ$  до  $-30^\circ$ .

Условия для появления доминирующего  $\text{He}^+$  в секторе день — вечер, как видно из рис. 1, во многом определяются поведением основной составляющей верхней ионосферы  $\text{O}^+$  на этих долготах. В работе [13] представлены широтные вариации  $\text{O}^+$  на высоте 1400 км по данным, полученным со спутника ISIS-2, часть из которых соответствует апрельским измерениям, т. е. близко к равенству. Диапазон местного времени и долготный диапазон полностью соответствуют нашему случаю. В области  $20^\circ$  дипольной широты зимнего полушария там также отмечается глубокий спад концентрации. Такой ход кривой в области американских долгот хорошо согласуется и с выводами, сделанными в работе [14], где показано воздействие нейтрального ветра на ионный состав. Из-за большого смещения плоскости магнитного экватора по отношению к географическому на американских долготах горизонтальные нейтральные ветры получают значительную асимметрию в геомагнитных координатах, и таким образом вертикальный компонент ветра, направленный вниз, понижает высоту слоя  $\text{O}^+$  (при

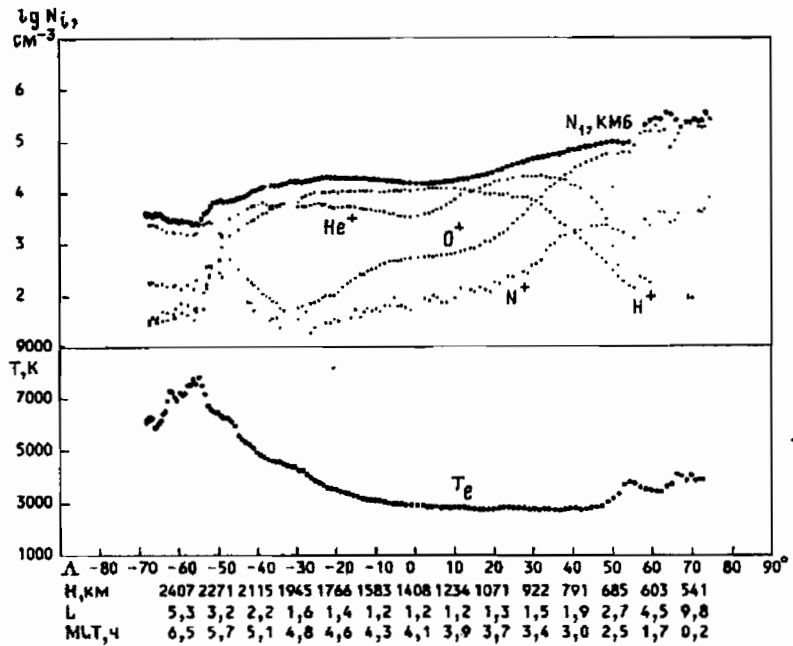


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для витка 6621, но в послеполуденное время Долгота прохождения экватора 176°. Область преобладания  $\text{He}^+$  по инвариантной широте от  $-33$  до  $-49^\circ$  в южном полушарии и от  $15$  до  $36^\circ$  в северном полушарии

этом увеличивается скорость рекомбинации) в южном полушарии в большей степени, чем в северном. Таким образом, транспортные процессы могут играть важную роль в появлении доминирующего  $\text{He}^+$  в определенных пространственных областях.

На рис. 2 показано распределение основных ионов  $\text{O}^+$ ,  $\text{N}^+$ ,  $\text{H}^+$  и  $\text{He}^+$  по инвариантной широте на половине витка 6621 для сектора ночь — утро (04.14 MLT), 14.III.1991 г., время от 14.16 до 15.12 UT, индекс  $K_p = 1^-$ . Из рисунка видно, что ход  $\text{O}^+$  имеет спад концентрации с высотой с двумя минимумами концентрации на  $20^\circ$  и в области  $-30 \div -40^\circ$  инвариантной широты. Концентрация  $\text{H}^+$  увеличивается от  $50^\circ$  до максимального значения в экваториальной области, практически становясь здесь постоянной и почти не имея заметного экваториального провала в области от  $30$  до  $-30^\circ$  инвариантной широты, и затем уменьшается в направлении провала в легких ионах на  $-55^\circ$ . В поведении  $\text{He}^+$  видны сильная асимметрия в концентрациях для обоих полушарий и значительный экваториальный провал, минимум которого находится на экваторе. Максимального значения  $2,7 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$  концентрация  $\text{He}^+$  достигает в области  $30^\circ$  инвариантной широты. Наибольшее превышение ионов гелия над остальными компонентами достигает 2,5 раза. В этой ситуации  $\text{He}^+$  становится доминирующим ионом как в северном полушарии, так и в южном. В северном полушарии область доминирования ионов гелия располагается от  $15$  до  $36^\circ$  инвариантной широты — на высотах от 850 до 1160 км. В южном полушарии эта область смещена в сторону более высоких широт и располагается от  $-33$  до  $-49^\circ$  инвариантной широты на высотах от 2015 до 2260 км. В области преобладания  $\text{He}^+$  электронная температура в северном полушарии остается неизменной и составляет около 3000 К, а в южном полушарии изменяется приблизительно от 5000 до 6000 К.

В качестве примера в секторе ночь — утро рисунок 2 выбран, чтобы показать достаточно большое превышение  $\text{He}^+$  над остальными компонентами в обоих полушариях. В целом этот пример типичен для поведения ионов гелия на многих

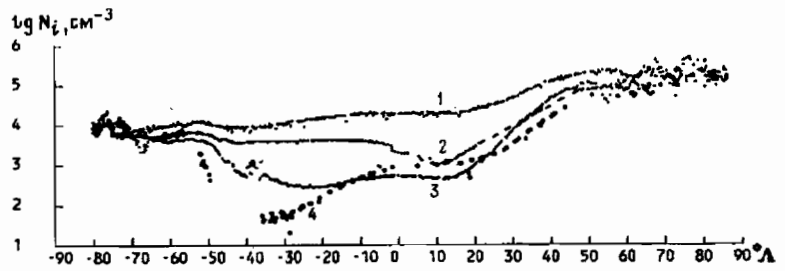


Рис. 3. Концентрации  $O^+$  по данным масс-спектрометра в зависимости от инвариантной широты для 4-х орбит  
 1 — 27.II, 06.00 MLT, высота  $\sim 1000$  км; 2 — 04.III 05.30 MLT, высота  $\sim 1200$  км;  
 3 — 08.III, 05.00 MLT, высота  $\sim 1300$  км; 4 — 17.III.1991 г., 04.00 MLT, высота  
 $\sim 1700$  км. Параметры орбит приведены для района экватора (долгота  $\sim 300^\circ$ )

других витках. Отличие от этой ситуации может проявляться в доминировании ионов гелия либо в одном, либо в другом полушарии, а также в вариациях широтных, высотных и долготных областей доминирования  $He^+$ , и в величине его доминирования. Здесь возможность преобладания ионов гелия также определяется поведением основного компонента ионосферы  $O^+$ . На рис. 3 показаны четыре графика поведения  $O^+$  по инвариантной широте, в области долготы  $300^\circ$ . Мы не будем обсуждать широтно-высотные вариации концентраций  $O^+$ . Единственная цель — показать поведение  $O^+$  во времени. Кривая 1 относится к периоду, когда ионы гелия еще не были преобладающими. Кривые 2, 3 и 4 относятся соответственно к датам, когда наблюдались области доминирования  $He^+$ . Для всех четырех приведенных случаев концентрации  $He^+$  оставались высокими, больше  $10^4$   $cm^{-3}$ . Видно, что концентрации  $O^+$  кривой 1 значительно выше последующих. Можно сделать вывод, что на такое резкое отличие, по-видимому, повлияли два фактора. Во-первых, изменение высоты орбиты на 100—150 км. Во-вторых, изменение местного времени на 30 мин, что может быть существенным в изменении концентрации  $O^+$  в утренние часы. Случай 1 относится к местному времени 06.00 MLT, а случай 2 уже к 05.30 MLT, и далее эта разница во времени увеличивается. Из анализа данных по  $O^+$ , приведенных в работе [13], для ночных и дневных условий на высоте 1400 км видно, что ход  $O^+$  в нашем случае (кривая 1) для февраля больше соответствует дневному ходу  $O^+$ , а для марта (кривые 2—4) — ночному ходу. Таким образом, ночные условия более подходят для преобладания  $He^+$  над  $O^+$ .

В секторе ночь — утро область высот преобладания  $He^+$  в целом составляет от 700 до 2500 км. Широтная область также значительна: от  $4^\circ$  до провала в легких ионах в северном полушарии и от  $-8^\circ$  до провала в легких ионах в южном полушарии. Долготные вариации  $He^+$  также влияют на его область доминирования, однако преобладание  $He^+$  видно в большой долготной области. Непосредственно в области экватора преобладания  $He^+$  нет. Это хорошо видно на рис. 4. Здесь по данным масс-спектрометрических измерений представлена карта высотно-широтных областей, где доминирует  $He^+$  для сектора ночь — утро. Карта представляет собой следы 40 траскторий в местах где  $He^+$  становится доминирующим ионом.

В работе [11] дана оценка феномена доминирования  $He^+$  по результатам измерений анализатора с тормозящим потенциалом на спутнике DE-2. Авторы показывают, что за образование слоя  $He^+$  ответственны состав нейтральной атмосферы и скорости фотоионизации в период высокой солнечной активности. Существенное влияние на это явление могут оказывать высота и величина максимума F слоя и шкала высот  $O^+$ , которые в свою очередь зависят от нейтральных ветров и E·B-дрейфа. Экспериментальные результаты относились к высоте 900 км и 22.00 LT. Модельные расчеты, сделанные для этих условий,

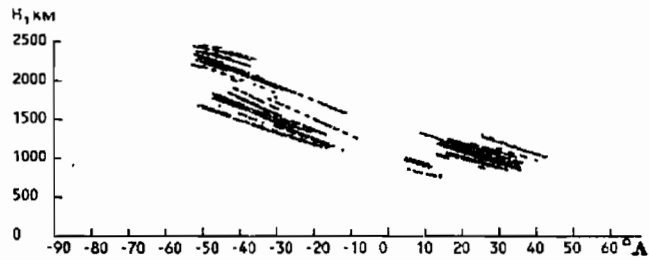


Рис. 4. Карта высотнo-широтных областей доминирования  $\text{He}^+$  по данным масс-спектрометра для послеполуночного времени в период равноденствия (следы 40 участков орбит).

Испосредственно в области экватора преобладания  $\text{He}^+$  нет

показали принципиальную возможность преобладания  $\text{He}^+$  на высотах, больших 900 км, при условии снижения концентрации нейтрального водорода в модели в 2 раза, а учет  $E \cdot V$ -дрейфа позволил снизить эту высоту, приблизив ее к высоте спутника. В наших условиях появление областей доминирования  $\text{He}^+$  ночью относится к гораздо большему диапазону высот и отличается местным временем, что, однако, не противоречит этим выводам. Кроме того, в нашем эксперименте наблюдается доминирование  $\text{He}^+$  в условиях полного освещения атмосферы в 15.30 MLT.

На рис. 1 и 2 хорошо видна асимметрия в поведении  $\text{He}^+$  в секторах день — вечер и ночь — утро, которая выражена в асимметрии абсолютных концентраций в горбах, связанных с образованием экваториального провала.

В работах [15, 16] показано, что асимметрия в горбах относительно геомагнитного экватора происходит из-за влияния нейтральных ветров. Причем в работе [15] указывается, что асимметрия в концентрации  $\text{He}^+$  наблюдается даже при симметричном распределении концентрации нейтрального гелия относительно экватора.

В нашем эксперименте для сектора день — вечер асимметрия в горбах с преобладанием концентрации в южном полушарии меняется на противоположную в области долгот от  $-70$  до  $-60^\circ$ . Анализ картины нейтральных ветров в период равноденствия в дневное время показывает, что именно в этой области долгот меняет знак компонент скорости нейтрального ветра вдоль магнитного меридиана. На представленном рис. 1 (область долгот  $-93^\circ$ ) отображена ситуация, где  $\text{He}^+$  испытывает значительный экваториальный провал, при этом концентрация в горбе в южном полушарии существенно выше концентрации в северном.

Для сектора ночь — утро (рис. 2) концентрация  $\text{He}^+$  в горбе в северном полушарии (высота  $800 \pm 1000$  км) в основном всегда выше концентрации в южном (высота  $\sim 2000$  км). В предположении диффузионного равновесия был восстановлен высотный ход  $\text{He}^+$  из данных по составу и температурам плазмы вдоль орбиты в районе от  $15$  до  $30^\circ$  инвариантной широты для обоих полушарий, где ионы гелия не испытывают значительных широтных вариаций. Мы сделали вывод, что такое поведение  $\text{He}^+$  может быть связано с характером его высотного распределения в ночных условиях, где в отличие от дневных концентрация  $\text{He}^+$  с высотой выше его максимума изменяется существенно. Необходимо также отметить, что орбита спутника полностью освещена, а высота тени достаточно низкая и сильно меняется вдоль орбиты. Эти обстоятельства затрудняют выделение ветровых широтных эффектов.

Естественно считать, что  $\text{He}^+$  будет доминировать с большей вероятностью в области горба с большим значением концентраций, однако ход концентраций  $\text{O}^+$  и  $\text{H}^+$  часто приводит к обратному результату.

Для наглядности влияния на доминирование  $\text{He}^+$  динамических процессов, связанных с нейтральными ветрами, приведен рисунок 5. На нем на графике зависимости геомагнитного склонения от географической долготы для  $30^\circ$  ди-

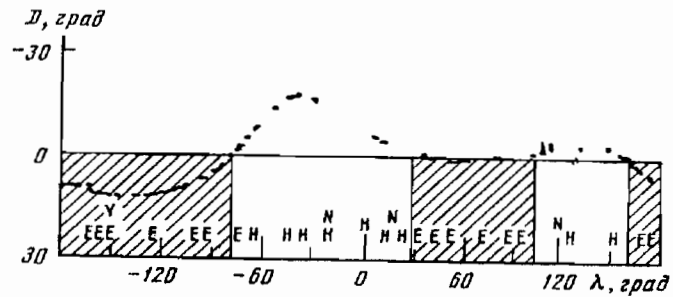


Рис. 5. Области доминирования ионов гелия в зависимости от геомагнитного склонения на  $30^\circ$  дипольной широты для различных географических долгот. Буквами *E* и *H* обозначены моменты доминирования и отсутствия доминирования  $\text{He}^+$  в эксперименте на спутнике «Интеркосмос-24». Буквами *Y* и *N* то же самое для спутника DE-2. Области положительного склонения заштрихованы

польной широты отмечены моменты доминирования на определенных долготах и отсутствия доминирования ионов гелия ночью в северном полушарии на высотах 800—1500 км. То же самое проделано с данными по ионному составу, полученными также ночью и в равноденствие на спутнике DE-2 и взятыми из работы [11]. Видно, что  $\text{He}^+$  преобладает в основном при положительном склонении. Со знаком склонения связано направление компонента зонального ветра. При положительном склонении ночью он направлен в северном полушарии к полюсу, что приводит к опусканию слоя  $\text{O}^+$  в область усиленных рекомбинационных процессов. Таким образом, преобладание  $\text{He}^+$  более вероятно при положительном склонении. Для окончательного вывода требуется более детальный анализ влияния нейтральных ветров,  $E \cdot V$ -дрейфов в период равноденствия и высокой солнечной активности, а также учет значительного изменения высоты вдоль орбиты, что должно быть предметом отдельного изучения.

Корреляция поведения концентрации  $\text{N}^+$  с поведением  $\text{He}^+$ , отмеченная выше при описании рис. 1, может указывать на то, что на данных высотах роль реакции  $\text{He}^+$  с  $\text{N}_2$ , которая служит одним из дополнительных источников образования  $\text{N}^+$ , могла бы, по-видимому, становиться заметной в условиях высоких концентраций  $\text{He}^+$ , которые мы наблюдаем, и  $\text{N}_2$ , и низкой концентрации  $\text{N}^+$ .

### Заключение

В статье приводятся результаты измерения  $\text{He}^+$  двумя независимыми методами — масс-спектрометрическим и зондовым — на спутнике «Интеркосмос-24» (приборы НАМ-5 и КМ-6), подтверждающие устойчивое доминирование ионов гелия и его высокую абсолютную концентрацию, достигающую до  $3,5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$  на низких и средних широтах в обоих полушариях, в широкой высотной области, в целом от 700 до 2500 км, в период весеннего равноденствия 1991 г. в конце трехлетнего периода около максимума 22 цикла солнечной активности. Такое абсолютное доминирование ионов гелия в широком долготном и высотно-широтном диапазоне в период равноденствия по существу впервые показано прямыми измерениями масс-спектрометрическим методом.

Рассмотрено явление доминирования ионов гелия в двух секторах местного магнитного времени, в секторе день — вечер (12.00 ÷ 18.00 MLT) и в секторе ночь — утро (00.00 ÷ 06.00 MLT).

Область доминирования ионов гелия в секторе день — вечер находится в южном полушарии и узком долготном поясе от  $245$  до  $290^\circ$ , что говорит о сильно выраженной долготной зависимости для данного геомагнитного сезона и местного времени. Доминирование  $\text{He}^+$ , достигающее 1,6 раза по отношению к другим



ионам, наблюдалось с 7 до 18. III для времени  $15.40 \div 16.44$  MLT на высотах  $1500 \div 2100$  км и в области инвариантных широт от  $-5^\circ$  до  $-30^\circ$ .

В секторе ночь — утро область высот преобладания  $\text{He}^+$  в широтной области от  $4^\circ$  до провала в легких ионах в северном полушарии составляет  $700 \div 1300$  км, а в области от  $-8^\circ$  до провала в легких ионах в южном полушарии  $1000 \div 2500$  км.  $\text{He}^+$  преобладает в большой долготной области. В этом секторе преобладание  $\text{He}^+$  над остальными компонентами достигает трехкратной величины.

Обнаружено, что в северном полушарии в секторе ночь — утро преобладание  $\text{He}^+$  связано со знаком склонения, а именно: это происходит при положительном склонении.

Приводится карта высотно-широтного распределения областей доминирования  $\text{He}^+$  в виде следов частей траектории спутника, где наблюдалось преобладание ионов гелия для сектора ночь — утро.

Таким образом, когда в условиях высокой солнечной активности концентрации  $\text{H}^+$  уменьшаются, при понижении в определенных пространственно-временных областях концентрации  $\text{O}^+$  могут создаваться условия для доминирования  $\text{He}^+$ .

Рассмотрены экспериментальные и теоретические работы, дающие общее представление о поведении  $\text{He}^+$  на протяжении четырех последних циклов солнечной активности. Наблюдается увеличение абсолютного и относительного содержания ионов гелия с ростом солнечной активности и, в частности, появление слоя, где доминирует  $\text{He}^+$ , в определенных пространственных областях во второй половине цикла солнечной активности, начиная с его максимума. Ответственными за увеличение абсолютной концентрации  $\text{He}^+$  вплоть до его преобладания признаются состав нейтральной термосферы и скорость фотоионизации. Важную роль в доминировании  $\text{He}^+$  играют высота F-слоя и шкала высот  $\text{O}^+$ . С другой стороны, на обширность и локализацию слоя, где доминирует  $\text{He}^+$ , особое влияние оказывают процессы переноса (нейтральные ветры, дрейфы) и химические процессы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nicolet M. J. Helium, as important constituent//J. Geophys. Res. 1961. V. 66. № 7. P. 2263—2264.
2. Hanson W. B. Upper-Atmosphere helium ions//J. Geophys. Res. 1962. V. 67. № 1. P. 183—189.
3. Bourdeau R. E., Whipple E. C., Jr., Donley J. L., Bauer S. J. Experimental evidence for the presence of helium ions based on Explorer VIII satellite data//J. Geophys. Res. 1962. V. 67. № 2. P. 467—475.
4. Boyd R. L. F., Susan Laflin. Positive ions in the topside ionosphere//Proc. Roy. Soc. A. 1968. V. 307. P. 449—470.
5. Taylor H. A., Jr., Brace L. H., Brinton H. C., and Smith C. R. Direct measurements of helium and hydrogen ion concentration and total ion density to an altitude of 940 kilometers//J. Geophys. Res. 1963. V. 68. № 19. P. 5339—5347.
6. Бреус Т. К. Ионы гелия в ионосфере: Препринт № 7365—120. М.: Радиотехнический институт АН СССР, 1965.
7. Тейлор-мл. Г. А., Мейр Х. Дж., Бринтон Г. К. Исследование ионов водорода и гелия в период увеличения солнечной активности//Масс-спектрометрия верхней атмосферы Земли. Л.: Гидрометеиздат, 1972.
8. Hoegy W. R., Grebowsky J. M. and Brace L. H. Ionospheric ion composition from satellite measurements made during 1970—1980: altitude profiles//Adv. Space Res. 1991. V. 11. № 10. P. (10)173—(10)182.
9. Goel M. K., 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.
10. Koleva R. and Kutiev I. S. On the Relative Abundance of helium Ions in the topside ionosphere//Adv. Space Res. 1985. V. 5. № 10. P. 37—40.
11. Heelis R. A., Hanson W. B., Bailey G. J. Distributions of  $\text{He}^+$  at middle and equatorial latitudes during solar maximum//J. Geophys. Res. 1990. V. 95. № A7. P. 10, 313—10, 320.
12. Афонин В. В., Гречнев К. В., Еришова В. А. и др. Ионный состав и температура ионосферы в максимуме 22 цикла солнечной активности, полученные со спутника «Интеркосмос-24» (проект «Активный») //Космич. исслед. 1994. Т. 32. Вып. 2. С. 82—94.

13. *Breig E. L., Hoffman J. H.* Variation in ion composition at middle and low latitude from ISIS 2 satellite//*J. Geophys. Res.* 1975. V. 80. № 16. P. 2207—2216.
14. *Brinton H. C., Mayr H. G., Pickett R. A., Taylor H. A., Jr.* The Effect of atmospheric winds on the  $O^+ - H^+$  transition level//*Space Res.* V. 10. Amsterdam: North—Holland Publ. Co. 1970. P. 652—662.
15. *Moffett R. J., Hanson W. B.* Calculated distributions of hydrogen and helium ions in the low-latitude ionosphere//*J. Atmos. Terr. Phys.* 1973. V. 35. P. 207—222.
16. *Murphy J. A. and Sutton A. E. and Heelis R. A.* The influence of neutral winds on  $He^+$  distributions in the equatorial ionosphere//*Planet. Space Sci.* 1984. V. 32. № 5. P. 543—550.

Поступила в редакцию  
23.XII.1993