

УДК 551.520.32

А. К. Федоренко

Інститут космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, Київ

**Вариации ионного состава F₂-области ионосферы
вблизи утреннего терминатора
по данным спутниковых наблюдений**

На основі супутникових спостережень низькоширотної F₂-області іоносфери проаналізовано варіації концентрацій іонів, які обумовлені сходом Сонця. Вплив фотоіонізації на іонний склад здійснюється як за рахунок безпосереднього збільшення концентрації плазми, так і за рахунок зміни швидкостей хімічних реакцій. У фотохімічному наближенні побудовано спрощену модель, яка задовільно описує експериментально спостережувані зміни концентрацій різних сортів іонів у перші години після початку іонізації.

ВВЕДЕНИЕ

При пересечении спутником границы между тенью Земли и освещенной Солнцем областью (терминатора) регистрируются значительные изменения ионосферных параметров, в первую очередь концентраций ионов. Случай, когда спутник вылетает из тени в освещенную область (утро) принципиально отличается от случая, когда спутник входит в тень Земли (вечер). После захода Солнца в течение нескольких часов происходят релаксационные процессы, и сохраняется достаточно высокий уровень ионизации. Утром же изменение параметров ионосферы должно происходить резко при критическом значении зенитного угла Солнца, соответствующем уровню экранирования ионизирующего ультрафиолета.

В данной работе исследуются вариации ионосферных параметров F₂-области при пересечении утреннего терминатора по данным наблюдений на спутнике Atmosphere Explorer-E (AE-E) (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/atmoweb>). В исследуемый период орбита была круговой, высота ее изменялась в пределах 250—425 км, наклонение составляло 19.7°. Такая конфигурация орбиты является практически оптимальной для исследования отклика низькоширотної F₂-області іоносфери на восход Солнца.

В работе проанализированы изменения концентраций основного иона O⁺ и молекулярных ионов NO⁺, O₂⁺ в первые часы после восхода Солнца, а также электронная температура T_e. Возникновение минимума концентрации ионов O⁺ и электронов вскоре после начала ионизации в F₂-области объясняется низкой скоростью фотоионизации в течение первого часа после восхода Солнца из-за экранирования ультрафиолета и быстрым разогревом тепловых электронов фотоэлектронами.

ИОННАЯ ХИМИЯ F₂-ОБЛАСТИ

Основным источником ионов и электронов в атмосфере средних и низких широт является фотоионизация нейтральных составляющих. Первичный ионный состав непрерывно видоизменяется за счет протекания ионно-молекулярных реакций (таблица). Преобладающим ионом на рассматриваемых высотах является O⁺. Реакции (1) и (2) определяют основные фотохимические потери этого иона и основную долю продукции молекулярных ионов NO⁺ и O₂⁺. На высотах F₂-области лишь незначительная часть ионов NO⁺ и не более 10 % O₂⁺ образуется непосредственно за счет фотоионизации из-за низких концентраций соответствующих нейтралов. Ион N₂⁺, наоборот, образуется только за счет

Основные химические реакции в F₂-области с участием ионов

Номер	Реакция	Коэффициент скорости, см ⁻³ с ⁻¹									
		[2]	[7]								
Ионно-молекулярные реакции											
1	O ⁺ + N ₂ → NO ⁺ + N	$\alpha_1 = 1.3 \cdot 10^{-12} (300/T_i) \Sigma \alpha_v X_v$ $v = 0-10^*$	$\alpha_1 = 1.2 \cdot 10^{-12} (300/T_n)^{0.5} (1.0 - e^{-3394/T_n}) + 8.0 \cdot 10^{-11} e^{-6788/T_n}$								
2	O ⁺ + O ₂ → O ₂ ⁺ + O	$\alpha_2 = 2 \cdot 10^{-11} (300/T_i)^{1/2}$	$\alpha_2 = 1.7 \cdot 10^{-11} (300/T_n)^{0.77} + 8.54 \cdot 10^{-11} e^{-3464/T_n}$								
3	O ⁺ + NO → NO ⁺ + O	$\alpha_3 = 2.3 \cdot 10^{-10}$	$\alpha_3 = 8 \cdot 10^{-13}$								
4	N ₂ ⁺ + O → NO ⁺ + N	$\alpha_4 = 1.4 \cdot 10^{-10}$	$\alpha_4 = 1.4 \cdot 10^{-10} (300/T_i)^{0.44}$								
5	N ₂ ⁺ + O ₂ → O ₂ ⁺ + N ₂	$\alpha_5 = 1 \cdot 10^{-10}$	$\alpha_5 = 5.0 \cdot 10^{-11} (300/T_i)^{0.8}$								
6	O ₂ ⁺ + NO → NO ⁺ + O ₂	$\alpha_6 = 6.3 \cdot 10^{-10}$	$\alpha_6 = 4.4 \cdot 10^{-10}$								
7	O ₂ ⁺ + N → NO ⁺ + O	$\alpha_7 = 1.8 \cdot 10^{-10}$	$\alpha_7 = 1.2 \cdot 10^{-10}$								
Реакции диссоциативной рекомбинации											
8	O ₂ ⁺ + e → → O(¹ D) + O(³ P) → O(¹ D) + O(¹ D) → O(¹ S) + O(¹ D)	$\beta_1 = 2.2 \cdot 10^{-7} (300/T_e)^{2/3}$	$\beta_1 = 1.95 \cdot 10^{-7} (300/T_e)^{0.7}, T_e \leq 1200 \text{ K}$ $\beta_1 = 1.61 \cdot 10^{-7} (300/T_e)^{0.56}, T_e \geq 1200 \text{ K}$ $\beta_{1a} = 0.609 \cdot \alpha_3$ $\beta_{1b} = 0.389 \cdot \alpha_3$ $\beta_{1c} = 0.002 \cdot \alpha_3$								
9	NO ⁺ + e → → N(⁴ S ⁰) + O → N(² D ⁰) + O	$\beta_2 = 4.1 \cdot 10^{-7} (300/T_e)^{1/3}$	$\beta_2 = 4.2 \cdot 10^{-7} (300/T_e)^{0.75}$ $\beta_{2a} = 0.24 \cdot \alpha_4$ $\beta_{2b} = 0.76 \cdot \alpha_4$								
10	N ₂ ⁺ + e → → N(² D ⁰) + N(⁴ S ⁰) → N(² D ⁰) + N(² D ⁰)	$\beta_3 = 2.9 \cdot 10^{-7} (300/T_e)^{1/3}$	$\beta_3 = 1.8 \cdot 10^{-7} (300/T_e)^{0.39}$ $\beta_{3a} = 0.88 \cdot \alpha_6$ $\beta_{3b} = 0.12 \cdot \alpha_6$								

v	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
α_v	1	1.56	33	174	252	58.6	140	105	123	123	123

* X_v — относительная заселенность колебательных уровней, α_v — отношение констант скоростей реакций с уровня v к соответствующим константам для уровня $v = 0$

фотоионизации. Фотохимические потери ионов NO⁺ и O₂⁺ происходят в быстрых реакциях (8), (9) рекомбинации с электронами, а иона N₂⁺ — преимущественно в ионно-молекулярных реакциях (4), (5).

В фотохимическом приближении концентрации ионов определяются скоростями реакций (1)—(10) (таблица), которые зависят в первую очередь от кинетических температур реагирующих частиц. Поскольку земная атмосфера уже выше 100 км является существенно неравновесной средой, кинетические температуры отдельных атмосферных составляющих: электронов T_e , ионов T_i и нейтралов T_n на высотах F₂-области могут различаться очень существенно. Скорости реакций α_1 и α_2 в общем случае зависят также от колебательной температуры T_k , которая характеризует распределение молекул по колебательным уровням, и в общем случае не равна T_n .

Значения коэффициентов скоростей реакций в таблице представлены по двум источникам [7] и [2]. Наиболее существенное различие наблюдается в α_1 и β_2 , т. е. относительно скоростей продукции и потерь NO⁺. В этих двух источниках отражено два несколько различных подхода к объяснению равновесных концентраций NO⁺. В работе [2] предполагается более слабая зависимость потерь от электронной температуры $\beta_2 \propto (300/T_e)^{1/3}$, но это компенсируется неявной зависимостью α_1 от T_e за счет учета колебательного возбуждения N₂. В работе [7] учитывается зависимость α_1 лишь от T_n , зато зависимость скорости рекомбинации от T_e более сильная $\beta_2 \propto (300/T_e)^{0.75}$.

В работе [7] учитывается зависимость α_1 лишь от T_n , зато зависимость скорости рекомбинации от T_e более сильная $\beta_2 \propto (300/T_e)^{0.75}$.

ВОСХОД СОЛНЦА НА ВЫСОТЕ СПУТНИКА

При выходе из тени Земли спутник на высоте h освещается Солнцем раньше, чем оно восходит для наземного наблюдателя с теми же географическими координатами. Поскольку земная атмосфера прозрачна только для видимого излучения, момент восхода Солнца на данной высоте не соответствует началу ионизации. Чтобы определить момент начала ионизации на высоте спутника, рассчитывались зенитные углы Солнца Z_1 , при которых на определенную высоту доходит ультрафиолетовое излучение с $\lambda > 280$ нм. Расчеты проводились в пренебрежении рассеянием излучения в нижних слоях атмосферы, допускалось также, что все частицы в атмосфере имеют одинаковое сечение поглощения σ . Зенитный угол Z_1 зависит от высоты орбиты и времени года. Из расчетов следует, что для спутника на высоте $h = 260$ км Солнце восходит при $Z_0 = 107^\circ$, а фотоионизация начинается при $Z_1 = 100^\circ$. В диапазоне зенитных углов $107^\circ \leq Z \leq 100^\circ$ ультрафиолет будет поглощаться преимущественно в толще атмосферы с освещенной стороны и не создаст ионизацию в окрестности спутника. Рассчитанные в таком приближении углы Z_1 соответствуют в экспериментальных данных моменту местного времени, когда наблюдаются резкое возрастание потока фотоэлектронов, температуры электронов и концентраций молекулярных ионов.

ВЛИЯНИЕ ФОТОИОНИЗАЦИИ НА ИОННЫЙ СОСТАВ

Воздействие фотоионизации на ионный состав F₂-области осуществляется по двум основным каналам:

- увеличение концентрации свободных ионов и электронов за счет непосредственной ионизации;
- изменение концентраций ионов вследствие зависимости коэффициентов фотохимических реакций от температуры.

Фотоионизация начинается, когда спутник выходит из тени Земли, и зенитный угол достигает критического значения Z_1 . Скорость фотоионизации $q \propto [N] \cdot I$, где $[N]$ — концентрация нейтралов, I — поток ионизирующего излучения. При падении излучения снизу ослабление потока I за счет большой концентрации нейтралов на луче вначале очень значительно, поэтому и скорость ионизации невелика. С уменьшением зенитного угла ослабление потока излучения становится меньше, при этом возрастает и поток фотоэлектронов, достигая максимума, когда атмосфера становится практически прозрачной для ионизирующего

ультрафиолета. Выше уровня эффективного поглощения (для средней активности Солнца около 200 км) $q \propto [N]$ и не зависит от I , т. е. будет определяться только количеством нейтралов.

Главным следствием фотоионизации является возникновение свободных фотоэлектронов и ионов. В результате фотоионизации атмосферных нейтралов на высотах F₂-области образуются электроны, а также преимущественно ионы O⁺ и N₂⁺. Ионы O⁺ и O₂⁺ образуются в основном в ионно-молекулярных реакциях. Так, для O₂⁺ продукция в ионно-молекулярных реакциях днем на высоте 260 км $\alpha_2 \cdot [O^+] \cdot [O_2] \approx 34 \text{ см}^{-3}$, а за счет фотоионизации — на порядок меньше: $j(O_2) \cdot [O_2] \approx 4 \text{ см}^{-3}$. Для иона O⁺ вклад фотоионизации в его продукцию еще меньше.

Другим следствием фотоионизации является быстрый разогрев тепловых электронов горячими фотоэлектронами. Средняя энергия фотоэлектронов, образующихся на высотах F₂-области, составляет около 10—20 эВ. Потери их энергии осуществляются многоступенчато за счет упругих и неупругих столкновений с окружающим частицами. Пока энергия достаточно велика, она расходуется в основном на возбуждение электронных, колебательных, вращательных уровней в неупругих столкновениях с атомами и молекулами. Электроны с энергией 2—3 эВ эффективно теряют свою энергию на возбуждение колебательных уровней молекул, в первую очередь N₂. Нагрев тепловых электронов в кулоновских столкновениях с фотоэлектронами становится эффективным, если энергия последних уменьшается примерно до 2 эВ.

Поскольку средняя энергия, теряемая электроном за одно упругое столкновение: $\Delta \epsilon \approx 2(M_e/M_j)3/2k(T_e - T_j)$, где j — частица, с которой электрон сталкивается, потери тепловой энергии в упругих столкновениях с ионами и нейтралами малы из-за отношения масс. По этой же причине скорость обмена энергией между электронами гораздо больше, чем между электронами и ионами. Время установления максвелловского равновесия внутри электронного компонента $\tau_{ee} \sim (10^{-3} - 1) \text{ с}$ [3], а $\tau_{ee} : \tau_{ei} = 1 : (M_i/M_e)$. Таким образом, фотоэлектроны нагревают преимущественно электронный газ.

В предположении преимущественной локальной термализации, которая преобладает до высот около 250 км (зависит от солнечной активности) [6], наблюдаемый вскоре после начала фотоионизации максимум электронной температуры обусловлен резким возрастанием потока фотоэлектронов. Эффект предсумеречного возрастания T_e , связанный с

перекачкой фотоэлектронов из магнито-сопряженной ионосферы, в нашем случае незначителен по двум причинам:

- 1) рассматриваем высоты преимущественной локальной термализации;
- 2) геометрия силовых линий геомагнитного поля на низких широтах такова, что угол между тенью Земли и силовой линией незначителен.

Таким образом, тепловые электроны реагируют быстро на возрастание потока фотоэлектронов увеличением T_e , в то время как ионы и нейтралы обладают «инерцией» относительно нагрева фотоэлектронами. Вследствие этого увеличение T_i и T_n с восходом Солнца происходит плавно по мере увеличения зенитного угла, не обнаруживая резкого всплеска, как электронная температура.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

На примере нескольких витков рассмотрим характер вариаций интересующих нас параметров ионосферы в утренние часы по местному времени.

На рис. 1 одновременно с возрастанием потока фотоэлектронов в диапазоне энергий 2–3 эВ наблюдается резкое увеличение концентраций молекулярных ионов NO^+ и O_2^+ . При этом основной ион O^+ отличается более плавным увеличением концентрации и тенденцией к уменьшению, когда градиент концентрации молекулярных ионов максимален.

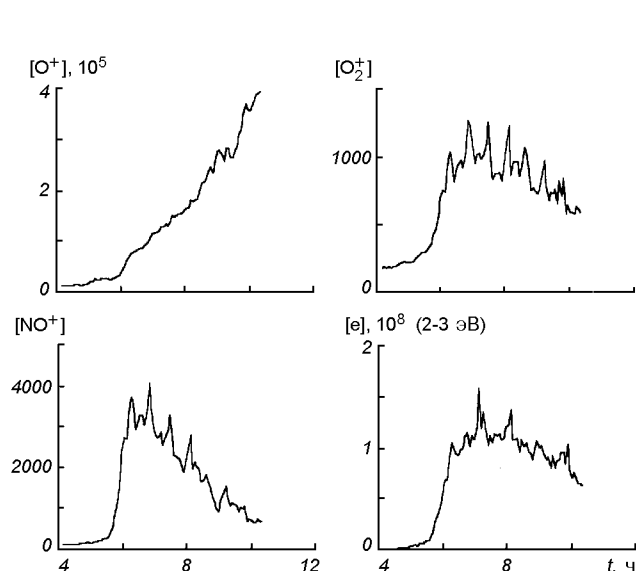


Рис. 1. Вариации концентраций ионов O^+ , O_2^+ , NO^+ см^{-3} и потока фотоэлектронов, $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{эВ}^{-1}$ в зависимости от местного времени

Виток 9135 (рис. 2) отличается тем, что в утренние часы спутник летел практически вдоль геомагнитного экватора. Наблюдаемое крупномасштабное возмущение параметров вероятно связано со сверхзвуковым движением терминатора. Отчетливо видна тесная связь между наблюдаемыми параметрами: вариации температуры электронов и концентрации молекулярных ионов происходят в противофазе с $[\text{O}^+]$. На нижнем графике одновременно нанесены в одном масштабе для сравнения концентрации NO^+ и O_2^+ . Видно, что относительные вариации $[\text{NO}^+]$ больше, чем $[\text{O}_2^+]$, особенно с увеличением T_e примерно до 3500–4000 К и выше.

На рис. 3 также наблюдается резкое увеличение концентраций молекулярных ионов с одновременным уменьшением концентрации O^+ , правда падение концентрации O^+ более ощутимое. Отчетливо видно одновременное уменьшение потока фотоэлектронов в диапазонах энергий 2–3 эВ и 7–9 эВ.

Таким образом, из спутниковых наблюдений следует, что начало фотоионизации на высотах F_2 -области обуславливает следующие вариации ионосферных параметров:

- 1) возрастание потока фотоэлектронов, особенно ощутимое для энергий 2–3 эВ;
- 2) увеличение температуры тепловых электронов примерно в два раза;
- 3) появление максимума концентрации молекулярных ионов (концентрация NO^+ увеличивается в 10–30 раз, O_2^+ в 4–6 раз), который достигается примерно через полчаса-час после начала фото-

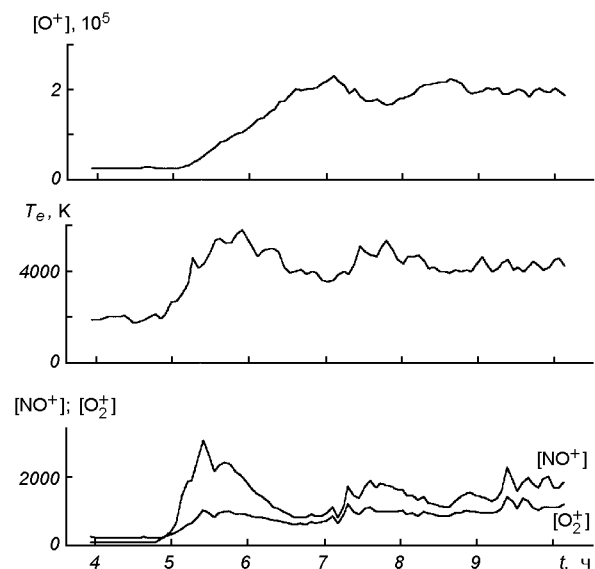


Рис. 2. Концентрации ионов O^+ , O_2^+ , NO^+ , см^{-3} и температуры электронов, К в зависимости от местного времени

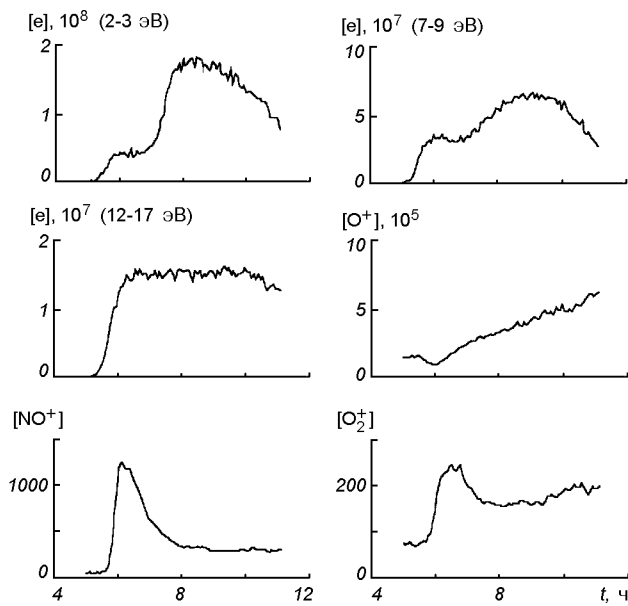


Рис. 3. Потоки фотоэлектронов в трех диапазонах энергий и концентрации ионов, см⁻³ в зависимости от местного времени

ионизации. Этот максимум совпадает во времени и в пространстве с локальным минимумом основного иона O⁺.

СВЯЗЬ С НАЗЕМНЫМИ НАБЛЮДЕНИЯМИ

Часть из перечисленных эффектов наблюдается также с поверхности Земли.

Утренний минимум ионизации вскоре после восхода Солнца проявляется в данных ионосферного вертикального зондирования [1]. В момент времени, когда на высотах F₂-области начинается фотоионизация, критическая частота f₀ вопреки ожиданию продолжает уменьшаться, достигая минимума, и начинает возрастать лишь спустя некоторое время. Поэтому говорят об эффекте запаздывания «радиовосхода» по сравнению с восходом видимым. Для объяснения эффекта временного запаздывания F₂ «радиовосхода» привлекаются так называемые терминаторные волны плотности, которые генерируются в нижней атмосфере (тропосфере, озоносфере) и распространяются вверх, испытывая селективное поглощение [1].

Вариации свечения отдельных атмосферных эмиссий можно рассматривать как индикаторы изменения других параметров, недоступных для наземных наблюдений. На увеличение концентрации

молекулярных ионов NO⁺ и O₂⁺ может указывать утреннее сумеречное усиление интенсивности свечения красной кислородной эмиссии O I λ 630.0 нм [4]. Для наземного наблюдателя сумерки соответствуют восходу Солнца в верхней атмосфере. Два основных механизма могут быть ответственны за сумеречное усиление красной линии: 1) диссоциативная рекомбинация молекулярных ионов NO⁺ и O₂⁺; 2) ударное возбуждение уровня O(¹D) фотоэлектронами с энергией выше 2 эВ.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ВАРИАЦИЙ ИОННОГО СОСТАВА

Решалась система уравнений непрерывности для разных сортов ионов в фотохимическом приближении. Для молекулярных ионов это приближение выполнимо за счет малых времен жизни относительно химических реакций. Днем:

$$\tau_{O_2^+} = 1/\beta_2 [e] \approx 60 \text{ с,}$$

$$\tau_{NO^+} = 1/\beta_2 [e] \approx 12 \text{ с,}$$

$$\tau_{N_2^+} = 1/\alpha_4 [O] \approx 5 \text{ с.}$$

Для преобладающего иона O⁺ фотохимическое время жизни велико: $\tau_{O^+} = 1/\alpha_1 [N_2] \approx 5 \cdot 10^3 \text{ с}$, и фотохимическое приближение на данных высотах в большинстве случаев не выполняется. Однако в приэкваториальной ионосфере в утренний период реализуются условия, когда влияние динамических процессов минимально. Утром (5—7^h LT) и вечером происходит смена знака скорости как вертикального, так и зонального электромагнитного дрейфов, и скорости дрейфовых движений минимальны в течение суток [5]. Усредненные суточные значения скорости и направления ветра и зональный дрейф плазмы обнаруживают тесную корреляцию [5], и скорости ветра также минимальны. Диффузия плазмы осуществляется практически горизонтально вдоль силовых линий, угол между магнитной силовой линией и условной линией терминатора мал. Поэтому можно предположить, что в утренние часы изменение концентрации иона O⁺ происходит лишь в результате химических реакций, а процессами переноса пренебрегаем. Учтем основные химические механизмы образования и потерь для различных сортов ионов в F₂-области (см. таблицу):

- ион O⁺ образуется в результате фотоионизации, погибает в столкновениях с нейтралами. Относительный выход продуктов при ионизации примем согласно [2]: O⁺(²D) - j =

$= 1.2 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ (32 %), $\text{O}^+(\text{}^2\text{P}) - j = 6.5 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$ (68 %), где j — вероятность ионизации атома O выше уровня эффективного поглощения;

- основные источники иона NO^+ — ионно-молекулярные реакции, потери — диссоциативная рекомбинация с электронами;
- основная продукция O_2^+ осуществляется в ионно-молекулярных реакциях, часть при фотоионизации, потери — в рекомбинации с электронами;
- N_2^+ образуется за счет фотоионизации с вероятностью $j(\text{N}_2) \approx 2 \cdot 10^{-7}$, потери в ионно-молекулярных реакциях.

Система уравнений непрерывности в фотохимическом приближении имеет вид

$$\begin{aligned} d[\text{O}^+]/dt &= \\ &= j(\text{O})[\text{O}] - \alpha_1[\text{O}^+][\text{N}_2] - \alpha_2[\text{O}^+][\text{O}_2] - \alpha_3[\text{O}^+][\text{NO}], \\ d[\text{NO}^+]/dt &= \alpha_1[\text{O}^+][\text{N}_2] + \alpha_3[\text{O}^+][\text{NO}] + \\ &+ \alpha_4[\text{N}_2^+][\text{O}] + \alpha_6[\text{O}_2^+][\text{NO}] - \beta_2[\text{NO}^+][e], \\ d[\text{O}_2^+]/dt &= j(\text{O}_2)[\text{O}_2] + \alpha_2[\text{O}^+][\text{O}_2] - \\ &- \beta_1[\text{O}_2^+][e] - \alpha_7[\text{O}_2^+][\text{N}] - \alpha_6[\text{O}_2^+][\text{NO}], \\ d[\text{N}_2^+]/dt &= \\ &= j(\text{N}_2)[\text{N}_2] - \alpha_4[\text{N}_2^+][\text{O}] - \alpha_5[\text{N}_2^+][\text{O}_2] - \\ &- \beta_3[\text{N}_2^+][e] - \alpha_8[\text{N}_2^+][\text{NO}]. \end{aligned}$$

В ионосфере должно также выполняться условие квазинейтральности:

$$[e] \approx [\text{O}^+] + [\text{NO}^+] + [\text{O}^{+2}] + [\text{N}_2^+].$$

В качестве начальных условий выбирались значения концентраций ионов, взятые из наблюдений, концентрации нейтралов из модели MSIS-90. В течение первого часа после восхода Солнца наблюдается значительное ослабление коротковолнового излучения. Чтобы учесть экранирование ультрафиолета, мы предположили, что вероятность ионизации основных нейтралов возрастает линейно от нуля в момент $t = 0$, и через час после «включения» фотоионизации достигают значений $j(\text{O})$, $j(\text{N}_2)$ и $j(\text{O}_2)$, соответствующих вероятностям ионизации выше уровня эффективного поглощения. Характер зависимости T_e от времени задаем, исходя из наблюдений, и аппроксимируем квадратичным полиномом.

В результате интегрирования системы уравнений непрерывности получаем зависимости концентраций ионов от времени после «включения» фото-

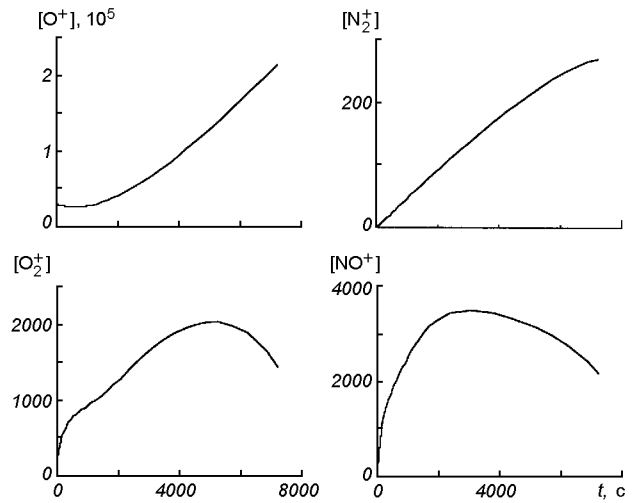


Рис. 4. Зависимость концентраций разных сортов ионов, см^{-3} от времени после включения фотоионизации

ионизации (рис. 4). Как видно, рассчитанные в фотохимическом приближении зависимости концентраций ионов от времени отражают как основные качественные особенности, так и количественно хорошо согласуются с наблюдениями.

Дополнительное химическое уменьшение концентрации O^+ с переработкой в молекулярные ионы по схеме (1) (таблица) возможно при наличии достаточного количества колебательно-возбужденных молекул N_2 . При быстром нагреве тепловых электронов фотоэлектронами создается неустойчивая ситуация. С увеличением температуры электронов отвод тепла от них к ионам уменьшается, так как сечение столкновений электрон-ион $\sigma_{ei} \propto T_e^{-1/2}$. Скорость охлаждения тепловых электронов на ионах:

$$L_{ei} = 7.7 \cdot 10^{-6} \cdot [e] \cdot [\text{O}^+] \cdot (T_e - T_i) / (16T_e^{3/2}).$$

Поэтому, чем больше нагрет электронный газ, тем менее эффективно происходит его охлаждение на ионах. В то же время с увеличением T_e возрастает скорость охлаждения электронов за счет колебательного возбуждения молекул N_2 .

Таким образом, характер наблюдаемых квазипериодических вариаций на рис. 3 можно объяснить увеличением фотохимических потерь O^+ в пользу молекулярных ионов в областях, где электронный газ разогрет до высоких температур (3000—4000 К и выше), и его охлаждение за счет колебательного возбуждения молекул N_2 начинает преобладать над охлаждением в кулоновских столкновениях с ионами.

ВЫВОДЫ

В результате анализа спутниковых данных выделены следующие особенности поведения F₂-области ионосферы после начала фотоионизации.

1. Характерное время переходного периода от ночного квазиравновесного состояния ионосферы к дневным значениям параметров составляет около 2 ч, пространственные размеры переходной области около 3 тыс. км.

2. По скорости отклика на «включение» фотоионизации отчетливо выделяются две группы ионосферных параметров:

— быстро реагируют (характерное время отклика около 10 мин): T_e и концентрации молекулярных ионов;

— медленно реагируют (характерное время отклика около часа): $[O^+]$, $[e]$, T_n , T_1 .

В рамках фотохимического приближения без привлечения дополнительных динамических механизмов удастся интерпретировать основные особенности поведения низкоширотной F₂-области ионосферы в утренние часы.

1. Васильев В. П., Шубова Р. С. Особенности поведения критической частоты F₂-области ионосферы в период восхода Солнца. — Харьков, 1990.—18 с.—(Препринт / АН УССР. Радиоастрономический ин-т; № 46).
2. Гордиец Б. Ф., Марков М. Н., Шелепин Л. А. Теория

инфракрасного излучения околоземного космического пространства // Тр. ФИАН.—1978.—105.—С. 6—70.

3. Маров М. Я, Колесниченко А. В. Введение в планетную астрономию. — М: Наука, 1987.—456 с.
4. Фишкова Л. М. Ночное излучение среднеширотной верхней атмосферы Земли. — Тбилиси: Мецниереба, 1983.—271 с.
5. Kelley M. C. The Earth's ionosphere plasma physics and electrodynamics. — Akad. Press. Inc. Inter. Geophys. Series.—1989.—471 p.
6. Schunk R. W., Andrew F. Nagy. Electron temperatures in the F region of the ionosphere: theory and observations // Rev. Geophys. and Space Phys.—1978.—16, N 3.—P. 355—399.
7. Strickland D. J., Bishop J., Evans J. S., et al. Atmospheric Ultraviolet Radiance Integrated Code (AURIC): theory, software architecture, inputs, and selected results // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.—1999.—62.—P. 689—742.

VARIATIONS OF ION CONCENTRATION OF F2 REGION OF THE IONOSPHERE IN THE VICINITY OF MORNING TERMINATOR FROM DATA OF SATELLITE OBSERVATIONS

A. K. Fedorenko

Variations of ion concentration caused by sunrise are analysed on the basis of satellite observations of low-latitude F2 region of the ionosphere. The photoionization influence on ion composition is caused both by direct increase of plasma density and by the variation of chemical reaction rates. A simplified model is constructed in the photochemical approximation. The model describes adequately detected changes of density of various ion components after the beginning of ionization.