

ЛИТЕРАТУРА

1. Горбенко Н. И., Ильин В. П., Попова Г. С., Свешников В. М. Пакет программ ЭРА для автоматизации электронно-оптических расчетов. — В кн.: Численные методы решения задач электронной оптики. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1979.
2. Дзагуров Л. Ю., Коваленко Ю. А. Учет влияния понов в задачах численного моделирования релятивистских электронных пучков. Деп. ВИНТИ № 1957 — 80, 1980.
3. Дзагуров Л. Ю. Методы расчета электронно-оптических свойств ускоряющих систем с газовым наполнителем. Автореф. канд. дис. М.: МФТИ, 1980.
4. Ильин В. П. Численные методы решения задач электрооптики. Новосибирск: Наука, 1974.
5. Алямовский И. В. Электронные пучки и электронные пушки. М.: Сов. радио, 1966.
6. Астрелин В. Т., Свешников В. М. Расчет движения релятивистских пучков заряженных частиц в электромагнитных полях. — ПМТФ, 1979, № 3.
7. Митчнер М., Кругер Ч. Частично ионизованные газы. М.: Мир, 1976.

Поступила 26/X 1984 г.

УДК 533.6.011.8+551.510.535

КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ РЕЛАКСАЦИЯ МОЛЕКУЛ CO_2 ПРИ ИНЖЕКЦИИ В ИОНОСФЕРУ

Н. М. Булгакова, А. К. Ребров

(Новосибирск)

В связи с активным освоением космического пространства ставится задача о влиянии полетов космических летательных аппаратов (КЛА) на состояние атмосферы. Двигатели КЛА выбрасывают в атмосферу большое количество молекул H_2O , H_2 , CO_2 . Инжектируемый газ, расширяясь, занимает в атмосфере объемы с линейным размером в десятки и даже сотни километров. При этом концентрация выбрасываемых молекул остается сравнимой с концентрацией атмосферных компонентов. С этой точки зрения инжекция выхлопных газов может дать ощутимый вклад в локальный тепловой баланс атмосферы. В [1] в связи с вышеуказанной проблемой рассмотрена задача о колебательной релаксации молекул воды за ударной волной. В данной работе решается задача о колебательной релаксации CO_2 при смешении с атмосферным газом.

В диапазоне температур 2000—3000 К колебательная релаксация CO_2 по сравнению с H_2O происходит медленно в столкновении с молекулами, скорости возбуждения колебательных степеней свободы CO_2 электронами существенно выше (примерно в 10^3). В F -области ионосферы степень ионизации атмосферного газа достигает 10^{-3} , и, следовательно, электроны могут сыграть определяющую роль в возбуждении колебательных уровней CO_2 , что в свою очередь скажется на тепловом излучении.

Поскольку возбуждение молекулярных газов электронами — естественное явление, наблюдающееся в верхних слоях атмосферы, то этой проблеме посвящено множество работ. В [2] проведен обзор работ по скоростям охлаждения электронов в ионосфере, [3] посвящена инфракрасному излучению невозмущенной верхней атмосферы с учетом возбуждения колебательных уровней CO_2 электронами и влияния на интенсивность инфракрасного излучения электрических полей, существующих в ионосфере. В данной работе ставится задача о влиянии электронов и электрических полей на колебательный энергообмен при смешении атмосферного и инжектируемого газов. Поскольку при инжекции молекул H_2O и H_2 в ионосферу наблюдается существенное снижение концентрации электронов [4], учитывается и этот эффект.

Постановка модельной задачи следующая. Считается, что атмосферный и инжектируемый газы мгновенно смешиваются с равными расходами и нагреваются при торможении за счет разницы скоростей. При этом реализуется разрыв газодинамических параметров, который аналогичен прохождению по смеси ударной волны. Рассматривается случай, когда смесь нагревается при таком смешении до температур ~ 2000 К и сжимается в 2—3 раза. В расчетах, результаты которых приведены ниже, инжектируемый газ состоит из равного количества CO , H_2 и H_2O с добавлением 4% CO_2 . Состав и газодинамические параметры атмосферного газа взяты из CIRA-72.

Численно решается система уравнений газовой динамики, описывающая ударную волну (здесь и далее под ударной волной подразумевается разрыв, о котором сказано выше), уравнений для заселенностей колеба-

тельных уровней N_2 , CO и CO_2 , уравнений, описывающих изменение концентрации электронов.

Система газодинамических уравнений в обычных обозначениях записывается в виде

$$\begin{aligned}
 (1) \quad & \rho u = \rho_1 u_1 + \rho_2 u_2 = 2\rho_1 u_1; \\
 (2) \quad & \rho u^2 + nkT = \rho_1 u_1^2 + \rho_2 u_2^2 + n_1 kT_1 + n_2 kT_2; \\
 (3) \quad & \frac{\rho u^3}{2} + n u c_{pf} k [T - (\Delta T)^{H_2O}] + nu (c^{CO} \mathcal{E}^{CO} + c^{CO_2} \mathcal{E}^{CO_2}) = \\
 & = \frac{\rho_1 u_1^3}{2} + \frac{\rho_2 u_2^3}{2} + n_1 u_1 c_{p1} k T_1 + n_2 u_2 c_{p2} k T_2 - Q,
 \end{aligned}$$

где индекс 1 относится к атмосферному газу, 2 — к инжектируемому; c_{pf} — теплоемкость, взятая с учетом того, что молекулы CO и CO_2 не возбуждены колебательно; c^{CO} и c^{CO_2} — концентрации CO и CO_2 ; Q — интегральное излучение из смеси.

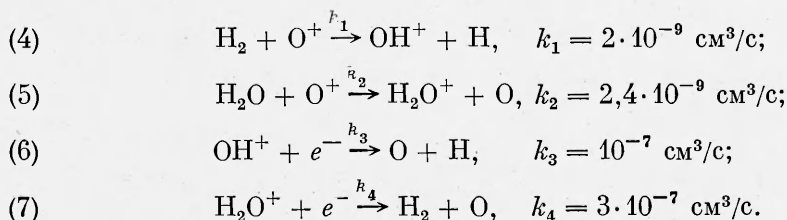
Колебательная кинетика H_2O рассчитывалась отдельно. Считая, что колебательные уровни H_2O не взаимодействуют с колебательными уровнями других компонентов, с целью упрощения расчета можно ввести в задачу уменьшение температуры $(\Delta T)^{H_2O}$ вследствие излучения воды. Поэтому проведен расчет по программе, используемой в [1], для рассматриваемых нами условий за ударной волной и состава смеси (уменьшение температуры на каждом шаге счета вводилось в систему (1)–(3)).

Совместно с уравнениями газовой динамики решалась система уравнений для заселенностей колебательных уровней CO , CO_2 , N_2 :

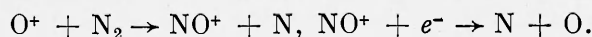
$$\frac{d\alpha_i}{dt} = \sum_K \left\{ n^K \left[\sum_j W_{ji}^K \alpha_j - \left(\sum_j W_{ij}^K \right) \alpha_i \right] \right\} - \frac{\alpha_i}{\tau_i},$$

где i, j — номера колебательных уровней; W_{ij}^K — константа скорости перехода между уровнями; α_i — заселенность i -го уровня; τ_i — время жизни i -го уровня; K — партнер по соударению, которым может быть N_2 , CO_2 , CO , O , H_2 , H_2O , e^- . Вследствие невысоких температур в задаче учтены первые колебательные уровни N_2 , CO и моды ν_3 CO_2 и четыре нижних колебательных уровня моды ν_2 CO_2 .

Уменьшение концентрации электронов осуществляется в процессах [4]



Скорости этих реакций на порядки превосходят скорость основного процесса рекомбинации, уравновешивающего процесс фотоионизации в невозмущенной ионосфере:



Уравнения, описывающие процессы (4)–(7), также введены в задачу.

Возникает вопрос об эволюции энергии электронов, обусловленной вкладом в возбуждение колебаний CO_2 . Совместно с описанной выше системой уравнений решалось уравнение для температуры электронов. Вначале оно записывалось в виде, предложенном в [3] для невозмущенной ионосферы, чтобы получить температуру электронов, при которой они смешиваются с инжектируемым газом.

При записи уравнения для температуры электронов в нестационарном случае при смешении инжектируемого и атмосферного газов необходимо учесть скорости охлаждения электронов на всех компонентах смеси. В области температур электронов, зарегистрированных в ионосфере, можно считать, что колебательное возбуждение CO, H₂ и H₂O электронами существенно меньше, чем возбуждение вращательных степеней свободы [5—7]. При степенях ионизации < 10⁻³ эффективным становится поступательный энергообмен электронов с нейтралами [8]. Важный процесс также — охлаждение электронов при колебательном возбуждении CO₂ [2].

Скорости охлаждения электронов при возбуждении вращательных степеней свободы молекул H₂ и CO₂ и колебательных степеней CO₂ рассчитывались по формулам из [2], где для H₂ взяты значения $B = 60,81 \text{ см}^{-1}$, $q = 0,484$. Для молекул, обладающих дипольным моментом, эти формулы несправедливы. Потому для молекулы CO сечение возбуждения вращательных степеней свободы медленными электронами взято из работы [6], экспериментальные данные которой можно приближенно описать формулой

$$\sigma_{\text{CO}}^R = 8,4 \cdot 10^{-15} T_e^{-1} \ln(T_e/18,3).$$

Такая же зависимость использована в [6] для анализа H₂O, где получено удовлетворительное согласие с имеющимися экспериментальными результатами.

При учете упругих соударений приняты обычные газокINETические сечения. Таким образом, к членам, описывающим охлаждение электронов в уравнении из [3], добавлены следующие:

$$\left(\frac{dT_e}{dt}\right)_{\text{H}_2\text{O}} = \left\{ 1,42 \cdot 10^{-16} \left(1 + \frac{964}{T} \right) T_e^{1/2} + 5,2 \cdot 10^{-9} \ln(T_e/18,3) T_e^{-1/2} \right\} \times \\ \times n^{\text{H}_2\text{O}} (T_e - T),$$

$$\left(\frac{dT_e}{dt}\right)_{\text{H}_2} = \left\{ 1,22 \cdot 10^{-15} \left(1 + \frac{234}{T} \right) T_e^{1/2} + 1,66 \cdot 10^{-9} T_e^{-1/2} \right\} n^{\text{H}_2} (T_e - T),$$

$$\left(\frac{dT_e}{dt}\right)_{\text{CO}} = \left\{ 1,44 \cdot 10^{-16} \left(1 + \frac{101}{T} \right) T_e^{1/2} + 5,2 \cdot 10^{-9} \ln(T_e/18,3) T_e^{-1/2} \right\} \times \\ \times n^{\text{CO}} (T_e - T),$$

$$\left(\frac{dT_e}{dt}\right)_{\text{CO}_2} = \left\{ 4,5 \cdot 10^{-10} T_e^{-1/2} + 6,2 \cdot 10^{-10} (1 + 2,5 \cdot 10^{-3} (T_e - T)) \right\} \times \\ \times n^{\text{CO}_2} (T_e - T).$$

Окончательно уравнение для температуры электронов в нестационарном случае имеет вид

$$\frac{dT_e}{dt} = \frac{2 \cdot 10^{15}}{v_{ei} + v_{en}} \left[E_{\parallel}^2 + E_{\perp}^2 \frac{(v_{ei} + v_{en})^2}{(v_{ei} + v_{en})^2 + \omega_z^2} \right] + \frac{7,73 \cdot 10^3}{N_e} \bar{E} q^{\text{ф.ион}} - \left(\frac{dT_e}{dt}\right)_i - \\ - \left(\frac{dT_e}{dt}\right)_O - \left(\frac{dT_e}{dt}\right)_{\text{N}_2} - \left(\frac{dT_e}{dt}\right)_{\text{H}_2\text{O}} - \left(\frac{dT_e}{dt}\right)_{\text{H}_2} - \left(\frac{dT_e}{dt}\right)_{\text{CO}} - \left(\frac{dT_e}{dt}\right)_{\text{CO}_2}.$$

Для рассматриваемых областей ионосферы ионизация высыпавшимися корпускулами несущественна. Вследствие малых плотностей поглощение излучения невелико, так что можно считать $W_z^{\text{ф.ион}} = W_{\infty}^{\text{ф.ион}}$ [9].

Описанная система уравнений решалась для различных плотностей атмосферного газа, характеризующих F-область ионосферы. Плотность электронов взята из [10—12], а колебательная температура азота для соответствующих условий — из [3, 13].

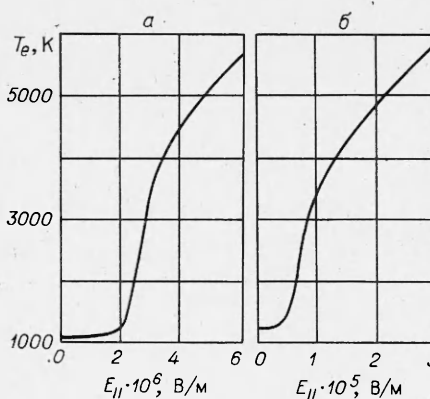
Приведенные ниже результаты расчетов получены при $n_1 = 8 \times 10^8 \text{ см}^{-3}$, $T_1 = 900 \text{ К}$, степень ионизации 10^{-3} (случай 1); $n_1 = 8 \times 10^9 \text{ см}^{-3}$, $T_1 = 700 \text{ К}$, степень ионизации 10^{-4} (случай 2); $n_1 = 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, $T_1 = 600 \text{ К}$ (случай 3). В третьем случае расчеты проведены для разных

степеней ионизации. Днем она составляет $7 \cdot 10^{-6}$, ночью $2 \cdot 10^{-6}$ [12]. По некоторым данным степень ионизации в случае 3 падает в ночных условиях вплоть до $2 \cdot 10^{-8}$ [11]. В случаях 1 и 2 плотность электронов остается высокой в течение суток за счет того, что ночью потоки плазмы направлены вниз из плазмосферы в поносферу [9].

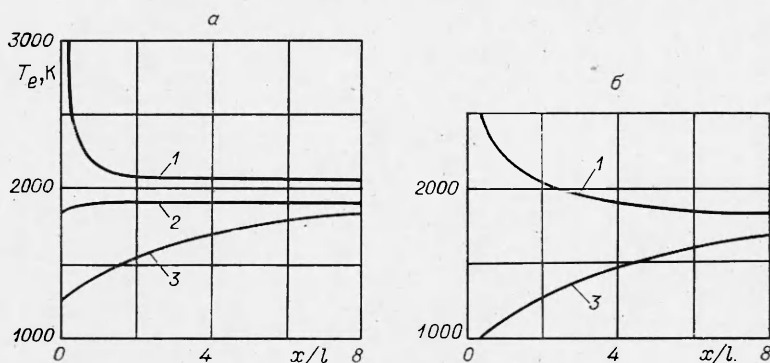
Решение уравнения для температуры электронов в невозмущенной ионосфере в зависимости от параллельной составляющей электрического поля для дневной среднеширотной ионосферы при средней солнечной активности приведено на рис. 1 для случаев 1 (а) и 2 (б). Член с перпендикулярной составляющей электрического поля при разумных значениях вплоть до 0,1 В/м [14] вклада в электронную температуру не вносит, поскольку гирочастота в наших условиях ($H \sim 0,45$ Гс) на несколько порядков превышает значения ν_{ei} и ν_{en} .

Поведение температуры электронов в зависимости от расстояния, нормированного на длину свободного пробега молекул в смеси l , приведено на рис. 2 для случаев 2 и 3 (линии 1—3 соответствуют $E_{\parallel} = 3 \cdot 10^{-5}$, $6 \cdot 10^{-6}$ В/м и $E_{\parallel} = 0$). Видно, что температура электронов после смещения атмосферного и инжектируемого газов быстро (на нескольких l) релаксирует к некоторому значению, характеризующему равновесие между различными механизмами нагрева и охлаждения электронов. Эта характерная температура лишь на несколько десятков градусов ниже температуры смеси. Электрическое поле, таким образом, будет влиять на колебательную релаксацию лишь на узком участке на границе облака инжектируемого газа, куда притекают «свежие» электроны из ионосферы. Поскольку электрическое поле в ионосфере быстро меняется во времени (за интервалы ~ 1 мин), проведен расчет для случая, когда электрическое поле начинает нарастать в момент смещения газов вплоть до $E_{\parallel} \sim 10^{-3}$ В/м (такие поля могут возникать во время геомагнитных бурь). Однако расчет показал, что и такое поле не успевает за рассматриваемые времена нагреть электроны хоть сколько-нибудь вследствие сжатия газа и увеличения потерь энергии электронами на возбуждение внутренних степеней свободы компонентов инжектируемого газа. Таким образом, электронная температура при смещении атмосферного и инжектируемого газов остается достаточно высокой для того, чтобы электроны могли внести существенный вклад в колебательное возбуждение молекул CO_2 .

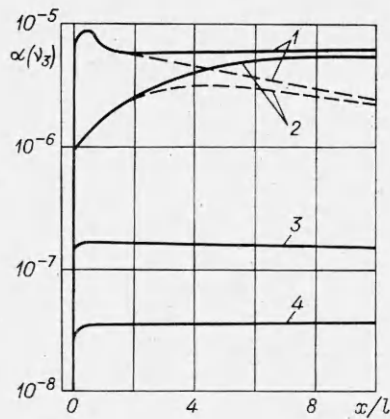
На рис. 3 приведены расчеты заселенности первого колебательного уровня моды ν_3 CO_2 в зависимости от расстояния за ударной волной для



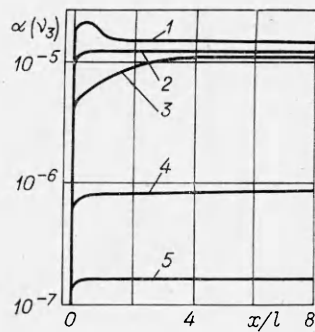
Р и с. 1



Р и с. 2

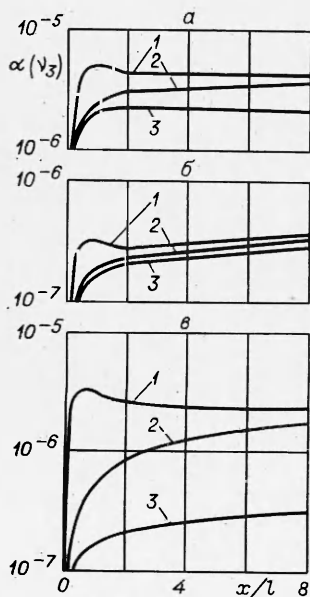


Р и с. 3



Р и с. 4

случая 1 (линии 1, 2 соответствуют $E_{\parallel} = 6 \cdot 10^{-6}$ В/м и $E_{\parallel} = 0$). Температура колебательных степеней свободы CO_2 T_v очень низка для рассматриваемых условий: без учета e^- $T_v \approx 170$ К (ночью). Электроны подмиаю T_v до 210 К. Заселенность моды ν_3 CO_2 до смешения с атмосферным газом полагалась нулевой, поскольку основные каналы возбуждения ν_3 — столкновения с электронами и атмосферным азотом. Следующий по значимости канал — обмен колебательной энергией с модой ν_2 CO_2 — дает при рассматриваемых температурах заселенность на порядки ниже приведенных на рис. 3—5. На рис. 3 показано, что электроны при рассматриваемых условиях вносят основной вклад в возбуждение моды ν_3 CO_2 , и приведены расчеты без учета электронов для дневной и ночной заселенностей атмосферного азота (линии 3, 4) и с электронами в случае с электрическим полем и без поля. Как уже отмечалось, влияние поля на заселенность ν_3 наблюдается лишь на границе облака инжектируемого газа, куда осуществляется приток электронов из невозмущенной области ионосферы. Штриховыми линиями отмечены заселенности моды ν_3 CO_2 при учете эффекта уменьшения концентрации электронов. В этих условиях уменьшение заселенности ν_3 на расстоянии $10 l$ составляет $\sim 30\%$. Далее вследствие диффузии облака в окружающий газ этот эффект должен замедляться. Как показано в [4], концентрация электронов при полетах КЛА падает примерно



Р и с. 5

в 3 раза и достигает минимума на временах, на порядок превышающих рассматриваемые здесь времена, которые составляют несколько секунд с момента инжекции газа. В случаях 2 и 3 процесс «выедания» электронов на рассматриваемых временах несуществен.

Для случая 2 поведение моды ν_3 CO_2 приведено на рис. 4 (линии 1—3 соответствуют $E_{\parallel} = 3 \cdot 10^{-5}$, $6 \cdot 10^{-6}$ В/м и $E_{\parallel} = 0$, 4 — без e^- (день), 5 — без e^- (ночь)). Видно, что и в этих условиях электроны играют основную роль в процессе колебательного возбуждения CO_2 .

На рис. 5 показана заселенность моды ν_3 CO_2 для случая 3 (линии 1, 2 соответствуют $E_{\parallel} = 5 \cdot 10^{-5}$ В/м и $E_{\parallel} = 0$, 3 — без e^-); а — дневная ионосфера со степенью ионизации $7 \cdot 10^{-6}$. Процесс резонансного обмена с атмосферным азотом и столкновения с электронами вносят равный вклад в возбуждение ν_3 CO_2 . Для ночной ионосферы картина может быть другой. Согласно [11], где указано, что степень ионизации ионосферного газа в таких ус-

ловиях падает до $2 \cdot 10^{-8}$, вклад электронов и атмосферного азота в рассматриваемый процесс мал, а заселение моды ν_3 CO_2 идет посредством $V - V$ -обмена с модой ν_2 (рис. 5, б). В [12] для тех же условий указана степень ионизации $2 \cdot 10^{-6}$. Характерно, что при этом заселенность моды ν_3 CO_2 определяют электроны (рис. 5, в).

Что касается заселенности моды ν_2 CO_2 , то она не испытывает столь выраженного влияния перечисленных процессов, поскольку в отличие от ν_3 мода ν_2 хорошо возбуждается и электронами, и в столкновениях с молекулами.

Газодинамические параметры смеси (за исключением T_e) мало меняются на рассматриваемых расстояниях за ударной волной. Слабый отток энергии из смеси вследствие излучения CO_2 и CO , заселенности колебательных уровней которых малы, не оказывает влияния на газодинамику задачи. Вода на рассматриваемых временах за счет излучения охлаждает смесь не более чем на десятки градусов. В заключение отметим, что в расчетах для случаев 1 и 2 взята характерная для среднеширотной дневной ионосферы степень ионизации. Сезонные и суточные вариации могут приводить к уменьшению в несколько раз концентрации электронов [15]. При высокой солнечной активности плотность электронов может быть выше используемой в данной работе. Однако на качественной картине проведенных расчетов эти вариации не сказываются.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ребров А. К., Чекмарев С. Ф., Чернявина Н. М. Колебательная релаксация и излучение паров H_2O при ударном нагреве смеси газов низкой плотности. — ПМТФ, 1982, № 3.
2. Далгарно А. Неупругие столкновения при низких энергиях. — В кн.: Лабораторные исследования аэрономических реакций. М.: Мир, 1970.
3. Гордиец Б. Ф., Марков М. Н., Шелепин Л. А. Теория инфракрасного излучения околоземного космического пространства. — Тр. ФИАН, 1978, т. 105, с. 7.
4. Mendillo M., Forbes J. M. Artificially created holes in the ionosphere. — J. Geophys. Res., 1978, v. 83, N A1.
5. Henry R. J. W., Chang E. S. Rotational-vibrational excitation of H_2 by slow electrons. — Physical Review A. General Physics, 1972, v. 5, N 1.
6. Phelps A. V. Rotational and vibrational excitation of molecules by low-energy electrons. — Reviews of Modern Physics, 1968, v. 40, N 2.
7. Rohr K. Characteristics of the threshold structures in the e- H_2O vibrational excitation. — J. Phys. B.: Atom. and Mol. Phys., 1977, v. 10, N 18.
8. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных газодинамических явлений. М.: Наука, 1966.
9. Кринберг И. А. Кинетика электронов в ионосфере и плазмосфере Земли. М.: Наука, 1978.
10. Bauer E., Kummeler R., Bortner M. H. Internal energy balance and energy transfer in the lower thermosphere. — Appl. Opt., 1971, v. 10, N 8.
11. Мак-Ивен М., Филиппс Л. Химия атмосферы. М.: Мир, 1978.
12. Neske E. Analysis of a high latitude electron density structure. — In: COSPAR, Space Research. Oxford: Pergamon Press, 1980.
13. O'Neil R. R., Pendleton W. R. et al. Vibrational temperature and molecular density of thermospheric nitrogen measured by rocket-borne electron beam induced luminescence. — J. Geophys. Res., 1974, v. 79, N 13.
14. Kist R., Klumpner D. A study of the cleft region using synoptic ionospheric plasma data obtained by the polar orbiting satellites AEROS-B and ISIS-2. — In: COSPAR, Space Research. Oxford: Pergamon Press, 1980.
15. Кринберг И. А., Тащилин А. В. Ионосфера и плазмосфера. М.: Наука, 1984.

Поступила 4/IX 1984 г.