Math-Net.Ru
All Russian mathematical portal

N. Yu. Romanyuha, Photo-chemical equilibrium disturbance caused by the natural and artificial factors,
Mat. Model., 1996, Volume 8, Number 11, 96–108

https://www.mathnet.ru/eng/mm1643

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use
https://www.mathnet.ru/eng/agreement

Download details:
IP: 18.97.14.91
December 12, 2025, 16:23:16

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

том **8** номер **11** год **1996**

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

НАРУШЕНИЕ ФОТОХИМИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ D-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНИХ ВОЗМУЩЕНИЙ

© *Н.Ю. Романюха*

Институт Динамики Геосфер РАН, Москва

Проводится количественное моделирование отклика *D*-области ионосферы в условиях нарушения фотохимического равновесия атмосферного газа. Исследования проводились на основе упрощенной нестационарной модели ионизационно-рекомбинационного цикла, описывающей динамику концентраций элекронов, четырех сортов положительных и трех сортов отрицательных ионов. Дается анализ изменчивости ионосферных параметров при вариациях плотности и температуры атмосферы, а также концентраций ряда малых нейтральных атмосферных составляющих. Предлагаются возможные механизмы моделируемых нарушений. Использованный подход позволяет связать данные натурных наблюдений, лабораторных и теоретических исследований и применить их для детального описания природных процессов.

PHOTO-CHEMICAL EQUILIBRIUM DISTURBANCE CAUSED BY THE NATURAL AND ARTIFICIAL FACTORS

N.Yu. Romanyukha

The approach to the modeling of the photo-chemical equilibrium disturbance caused by natural and artificial factors is proposed. The model is used describing the dynamics of some charged particles, in particular generalized species of ions concentrations. It allows to estimate the sensitivity of ionospheric plasma parameters to the density, temperature and minor neutral constituents variations. This approach may be used to link quantitatively the data of the ionospheric direct measurements, laboratory experiments and theoretical investigations.

1. Введение

Землетрясения, извержения вулканов, падения крупных метеоритов, сильные взрывы являются источниками возникновения возмущений различных характеристик геосфер. Если к этому добавить нарастающее антропогенное воздействие, приводящее к поступлению химически активных веществ в разные слои атмосферы, очевидно, становится актуальной задача моделирования реакции ионосферы на разнообразные внешние воздействия.

Наименее изученной областью ионосферы является *D*-область, располагающаяся на высотах 40-90 км. Здесь сохраняются достаточно высокие концентрации атмосферных составляющих, свойственных нижним слоям атмосферы, и происходит поглощение и трансформация части ионизирующего солнечного излуче-

ния. Сочетание достаточного количества энергии и разнообразие химического состава определяют сложность ионизационно-рекомбинационных процессов в этой области. В частности, здесь играют активную роль отрицательные ионы и сложные положительные ионы-кластеры, не встречающиеся в более высоких областях ионосферы.

С другой стороны, состав и концентрация присутствующих в *D*-области ионов существенно зависят не только от гелиофизических и космофизических параметров (например, солнечной активности, зенитного угла Солнца и других), но в значительной мере определяются такими факторами, как изменение плотности и температуры нейтральной атмосферы и концентраций ряда химически активных малых нейтральных составляющих (МНС), которые приводят к перестройке ионизационно-рекомбинационного цикла и, следовательно, изменению электронной плотности. Указанные изменения могут являться следствием различных процессов и явлений в более низких слоях атмосферы и литосфере.

Имеющиеся экспериментальные данные [1-3] показывают, что акустические и акустико-гравитационные волны вызывают возмущение электронной плотности, что надежно регистрируется радиофизическими методами. Результаты радиофизических измерений используются для оценки пространственно-временных и спектральных характеристик возмущений в ионосфере. Помимо возмущений электронной плотности, вызванных акустическими волнами во время землетрясений, аналогичные явления были обнаружены и в периоды подготовки сильных землетрясений.

В частности, в [4] одновременно с моментом землетрясения наблюдалось резкое возмущение ионосферы. Это явление не может быть объяснено акустическим воздействием, так как акустическая волна еще не успела достигнуть к этому моменту наблюдаемой области ионосферы. Причину изменений электронной плотности в этом случае можно связать с изменением температуры нейтральной атмосферы, вызванной действием электрических полей, генерируемых на стадии подготовки землетрясения [5]. Сильная зависимость электронной плотности от температуры атмосферного газа отмечается в ряде работ [6,7]. Другим важным фактором, влияющим на формирование электронной плотности в *D*-области, является изменение концентраций химически активных МНС, определяемых динамическими процессами, происходящими в тропосфере и литосфере [6].

В данной работе проводится количественное моделирование отклика *D*-области в условиях нарушения фотохимического равновесия атмосферного газа. Рассматривались следующие случаи:

- изменение концентраций заряженных частиц при возмущении *D*-области акустическими и акустико-гравитационными волнами;
- исследование влияния возмущений температуры на параметры ионосферной плазмы;
- изменение аэрономических параметров и электронной концентрации при изменениях концентраций МНС.

Исследования проводились на основе упрощенной нестационарной модели ионизационно-рекомбинационного цикла, описанной в [8]. В качестве основных компонент рассматриваются электроны, четыре сорта положительных и три сорта отрицательных ионов. Эффективные скорости преобразования ионов в модели являются нелинейными многопараметрическими функциями, зависящими от скорости ионизации, плотности, температуры газа и концентраций таких МНС как CO_2, H_2O, O_3, NO, $O(^3P)$, $O_2(^1\Delta g)$.

2. Постановка задачи

Для моделирования описанных выше случаев использовалась математическая модель преобразования положительных и отрицательных ионов, представляющая собой систему восьми обыкновенных дифференциальных уравнений [8]. Особенность применяемого подхода заключается в следующем. В цепочке преобразования положительных ионов наряду с первичными простыми ионами O_2^+, NO^+ рассматриваются более тяжелые сложные кластерные ионы, например, $H^+(H_2O)_n$, $NO^+(H_2O)_n$, обозначаемые Cb_1^+ при $n \le 3$ и Cb_2^+ при $n > 3$, со следующим свойством – коэффициенты диссоциативной рекомбинации удовлетворяют неравенству $\alpha_{O_2^+} < \alpha_{Cb_1^+} < \alpha_{Cb_2^+}$. В цепочке преобразования отрицательных ионов выделены три группы ионов в зависимости от их устойчивости к процессам отлипания. Первичные ионы K^- отождествляются с O_2^-; C^- – группа ионов $O_3^-, O_4^-, CO_3^-, CO_4^-$; N^- – стабильные конечные ионы вида NO_3^-, $NO_3^-(H_2O)$ и т.д. Скорости отлипания электронов соответственно $\delta_{K^-} > \delta_{C^-}$, $\delta_{N^-} = 0$, то есть ионы N^- исчезают только в процессах ион-ионной рекомбинации.

Уравнения модели можно записать в виде

$$
\begin{aligned}
\frac{d[NO^+]}{dt} &= q_{NO^+} + D\,[O_2^+] - [NO^+](A_{NO^+} + \alpha_{NO^+} n_e + \alpha_l n^-)\,, \\
\frac{d[O_2^+]}{dt} &= q_{O_2^+} - [O_2^+](A_{O_2^+} + D + \alpha_{O_2^+} n_e + \alpha_l n^-), \\
\frac{d[Cb_1^+]}{dt} &= A_{NO^+}[NO^+] + A_{O_2^+}[O_2^+] - [Cb_1^+](B_k + \alpha_{Cb_1^+} n_e + \alpha_l n^-), \\
\frac{d[Cb_2^+]}{dt} &= B_k[Cb_1^+] - [Cb_2^+](\alpha_{Cb_2^+} n_e + \alpha_l n^-), \\
\frac{d[K^-]}{dt} &= \beta\, n_e + \beta_{-1}[C^-] - [K^-](\beta_1 + \delta_{K^-} + \alpha_l n^+)\,, \qquad (1) \\
\frac{d[C^-]}{dt} &= \beta_1[K^-] - [C^-](\beta_{-1} + \beta_2 + \delta_{C^-} + \alpha_l n^+), \\
\frac{d[N^-]}{dt} &= \beta_2[C^-] - \alpha_l n^+[N^-]\,, \\
\frac{dn_e}{dt} &= q + \delta n^- - \beta n_e - \bar{\alpha} n_e n^+\,.
\end{aligned}
$$

Здесь q – скорость ионизации атмосферы внешним источником излучения, $n^+ = [O_2^+] + [NO^+] + [Cb_1^+] + [Cb_2^+]$, $n^- = [K^-] + [C^-] + [N^-]$, $[O_2^+]$, $[NO^+]$, $[Cb_1^+]$, $[Cb_2^+]$, $[K^-]$, $[C^-]$, $[N^-]$ – концентрации ионов O_2^+, NO^+, Cb_1^+, Cb_2^+, K^-, C^-, N^- соответственно; β – скорость прилипания электронов к нейтральным молекулам, α_l – коэффициент ион-ионной рекомбинации, $\bar{\delta}$ – средний коэффициент отлипания электронов в соударениях и фотопроцессах, $\bar{\alpha}$ – средний коэффициент диссоциативной рекомбинации:

$$\bar{\delta} = \Big(\sum_i \delta_i\, n_i^-\Big) / \Big(\sum_i n^-\Big), \qquad \bar{\alpha} = \Big(\sum_j \alpha_j n_j^+\Big) / \Big(\sum_j n_j^+\Big), \qquad (2)$$

δ_i – скорость отлипания электронов от i-го сорта отрицательных ионов, α_j –

коэффициент диссоциативной рекомбинации j-го сорта положительных ионов. В рамках принятой модели

$$\alpha_{O_2^+}=4.10^{-7}(300/T)^{1.5}, \qquad \alpha_{NO^+}=2.10^{-7}(300/T)^{1.5},$$

$$\alpha_{Cb_1^+}=2.10^{-6}(300/T)^{0.5}, \qquad \alpha_{Cb_2^+}=10^{-5}(300/T)^{0.5},$$

T – температура атмосферного газа; $D=6.31\cdot10^{-10}[NO]+10^{-15}[N_2]$; c^{-1} – скорость образования ионов $[NO^+]$ из ионов $[O_2^+]$; A_{NO^+}, $A_{O_2^+}$ – эффективные скорости преобразования первичных ионов O_2^+ и NO^+ в кластерные ионы вида Cb_1^+; B_k – эффективные скорости преобразования Cb_1^+ в Cb_2^+; β_1 – скорость преобразования первичных отрицательных ионов K^- в C^-, β_{-1} – скорость обратного процесса, β_2 – скорость преобразования ионов C^- в стабильные ионы N^-; $q_{O_2^+}$, q_{NO^+} – скорости образования ионов O_2^+, NO^+ под действием источника q; эти скорости равны $q_{O_2^+}=\gamma_{O_2^+}q$, $q_{NO^+}=\gamma_{NO^+}q$, где коэффициенты $\gamma_{O_2^+}$, γ_{NO^+} определены в [8]. Эффективные скорости процессов (коэффициенты A_{1NO^+}, $A_{2O_2^+}$, B_k, β_1, β_{-1}, β_2, δ_{C^-}, δ_{K^-}) являются аналитически заданными функциями n_e, $q(t)$ и могут легко быть рассчитаны по формулам, приведенным в [8].

В качестве начальных значений концентраций $n_j(0)=n_{j0}$, $j=\overline{1,8}$ для численного интегрирования системы (1) выбирались фоновые концентрации заряженных компонент, рассчитанные для зимней среднеширотной атмосферы на заданной высоте h в невозмущенных условиях при фоновых значениях скоростей ионизации. Полученная задача Коши численно решалась методом Гира [9] для различных видов возмущений, вносимых в правые части системы (1).

Введем в рассмотрение, аналогично [6], ряд аэрономических параметров, наиболее часто используемых при анализе процессов, протекающих в ионосфере и удобных для интерпретации результатов численного моделирования. Помимо среднего коэффициента диссоциативной рекомбинации $\bar{\alpha}$, определенного формулой (2), это f^+ – относительное содержание ионов-связок, ϕ^+ – относительное содержание простых ионов $[NO^+]$ и $[O_2^+]$. В рамках принятой модели формулы для расчета $\bar{\alpha}$, f^+, ϕ^+ имеют вид

$$\bar{\alpha} = (\alpha_{NO^+}[NO^+]+\alpha_{O_2^+}[O_2^+]+\alpha_{Cb_1^+}[Cb_1^+]+\alpha_{Cb_2^+}[Cb_2^+])/\ n^+ , \tag{3}$$

$$f^+ =([Cb_1^+]+[Cb_2^+])/([NO^+]+[O_2^+]) , \tag{4}$$

$$\phi^+ = [NO^+]/[O_2^+] . \tag{5}$$

Выполнив в (3) простые преобразования, запишем:

$$\bar{\alpha} = \{(\alpha_{O_2^+}+ \alpha_{NO^+}[NO^+]/[O_2^+])[O_2^+]/([NO^+] + [O_2^+])(\alpha_{Cb_1^+}[Cb_1^+]+$$
$$+\alpha_{Cb_1^+}[Cb_2^+])/([NO^+]+[O_2^+])\}/\{1+([Cb_1^+]+[Cb_2^+])/([NO^+]+[O_2^+])\}.$$

С учетом (4), (5) получим

$$\bar{\alpha}=\{(\alpha_{O_2^+}+\phi^+\alpha_{NO^+})/(1+\phi^+)+f^+(\alpha_{Cb_1^+}[Cb_1^+]+\alpha_{Cb_2^+}[Cb_2^+])/$$
$$/([Cb_1^+]+[Cb_2^+])\}/(1+f^+).$$

Обозначив, аналогично [6],

$$\alpha_n = (\alpha_{NO^+}\ \phi^+ + \alpha_{O_2^+})/(1+\phi^+), \tag{6}$$

$$\alpha_c = (\alpha_{Cb_1^+}[Cb_1^+] + \alpha_{Cb_2^+}[Cb_2^+])/([Cb_1^+]+[Cb_2^+]), \tag{7}$$

получим

$$\overline{\alpha} = (\alpha_n + f^+\alpha_c)/(1+f^+), \tag{8}$$

где α_n – средний коэффициент диссоциативной рекомбинации простых ионов, α_c – средний коэффициент диссоциативной рекомбинации кластерных ионов.

3. Волновое возмущение D-области

В условиях возмущения ионосферы акустической волной, в предположении полного увлечения заряженных частиц нейтральным газом и в пренебрежении диффузией, локальное изменение концентрации j-й заряженной частицы описывается уравнением

$$\frac{dn_j}{dt} = \mathrm{div}(n_j\vec{\vartheta}) + q_j + P_j - n_jL_j\ . \tag{9}$$

Выразим $\mathrm{div}(n_j\vec{\vartheta})$ через плотность среды ρ, так как в решаемой задаче известен именно закон изменения плотности. Учитывая, что в акустической волне $\vec{\vartheta}\,\partial\rho/\partial x << \partial\rho/\partial t$, то есть $\partial\rho/\partial t = -\rho\,\mathrm{div}\vec{\vartheta}$, получим

$$n_j\ \mathrm{div}\vec{\vartheta} = \frac{n_j}{\rho}\frac{\partial\rho}{\partial t} = n_j\frac{\partial}{\partial t}\ln\rho = n_j\frac{\partial}{\partial t}\ln\frac{\rho}{\rho_0}\ .$$

Тогда уравнение (9) может быть записано в виде:

$$\frac{dn_j}{dt} = q_j + P_j - n_jL_j - n_j\frac{d}{dt}(\ln(\frac{\rho(t)}{\rho_0})). \tag{10}$$

Здесь $n_j \in \{[NO^+],\ [O_2^+],\ [Cb_1^+],\ [Cb_2^+],\ [K^-],\ [C^-],\ [N^-],\ n_e\}$, P_j, n_jL_j – соответственно скорости образования и потерь частицы j-го вида в химических процессах. Параметры q_j, P_j, L_j также являются функциями изменяющихся плотности и температуры среды. В численных экспериментах параметры возмущения нейтральной атмосферы задавались в виде модельных функций. Перепад давления $\Delta p(t)/p_0$ в волне задается синусоидой с амплитудой A и периодом T. Изменения плотности $\rho(t)$ и температуры $T(t)$ нейтральной атмосферы определяются согласно адиабатическому закону:

$$\frac{\rho(t)}{\rho_0} = (1+\frac{\Delta p(t)}{p_0})^{1/\gamma}, \qquad \frac{T(t)}{T_0} = (1+\frac{\Delta p(t)}{p_0})^{(\gamma-1)/\gamma}, \tag{11}$$

где ρ_0 и T_0 – соответственно плотность и температура невозмущеннной атмосферы на заданной высоте h, $\gamma = 1.4$ – показатель адиабаты идеального газа. Расчеты проводились для значений периодов $\tilde{T} = 1000$ с и $\tilde{T} = 10$ с. Точка наблюдения располагалась на высотах $h = 60$ км и $h = 80$ км соответственно.

Результаты расчетов возмущений концентраций заряженных частиц, вызываемых изменением плотности и температуры среды в акустико-гравитационной волне (АГВ) с периодом 1000 с, представлены на рис.1. Кривые 1,2 соответствуют изменению относительной электронной концентрации n_e/n_{eo} на высоте

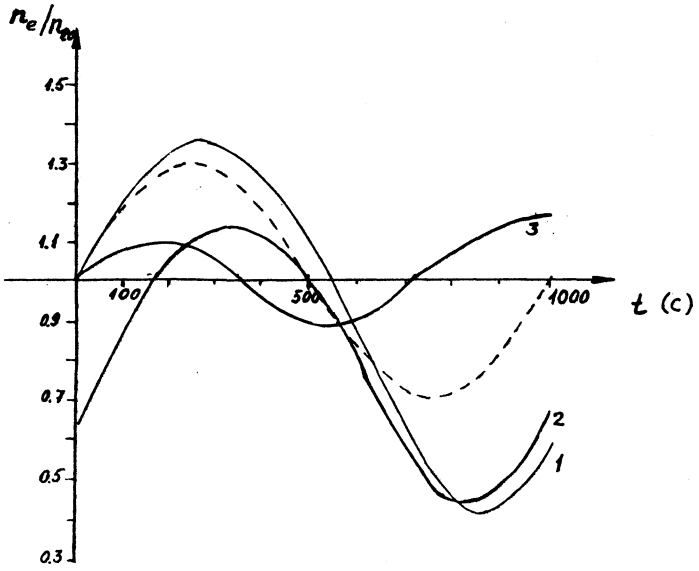

Рис. 1. Изменение относительной электронной концентрации во времени при прохождении волны с периодом $T=1000$ с на высоте $h=80$км и $h=60$км. Штриховая линия - зависимость $\rho(t)/\rho_0$, линия 1 - $n_e(t)/n_{e0}$ при $0\le t\le T$, $h=80$км, линия 2 - $n_e(t)/n_{e0}$ при $2\tilde{T}\le t\le 3\tilde{T}$, $h=80$км, линия 3 - $n_e(t)/n_{e0}$ при $0\le t\le \tilde{T}$, $h=60$км.

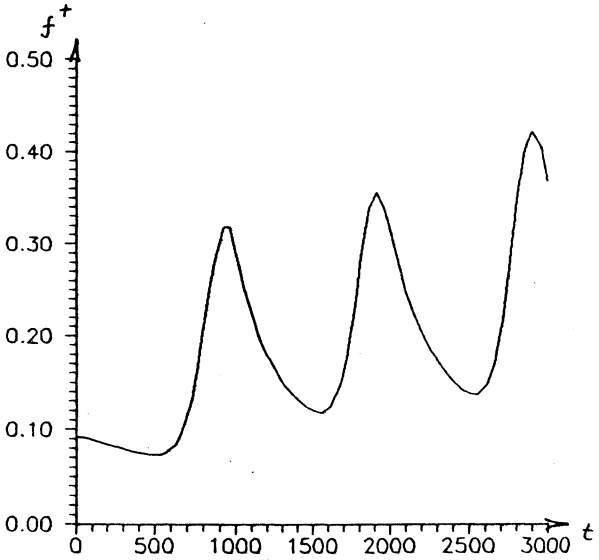

Рис. 2. Рост относительного содержания ионов-связок при прохождении волны с периодом $\tilde{T}=1000$ с на высоте $h=80$км.

80 км в течение первого и третьего периодов колебаний. Нарастание со временем величины отклонения n_e/n_{eo} от ρ/ρ_o можно интерпретировать как нарушение фотохимического равновесия в верхней части D-области при прохождении АГВ. Возможен следующий механизм этого явления. Основным процессом гибели электронов в этой области является диссоциативная рекомбинация. Величина среднего коэффициента диссоциативной рекомбинации α может быть определена по формуле (8).

На рис.2 показано изменение величины относительного содержания ионов-связок f^+ (4) при прохождении волны. Видно, что вариации f^+ коррелируют с вариациями плотности и температуры среды. В фазе сжатия температура растет, а f^+ уменьшается, так как скорость образования ионов-связок имеет сильную обратную зависимость от температуры. Подробнее это будет обсуждено дальше в разделе 4. В фазе разрежения наблюдается падение температуры и рост f^+. В то же время наблюдается заметный рост f^+ от периода к периоду, что приводит согласно (8) к росту средней скорости диссоциативной рекомбинации $\overline{\alpha}$ и, следовательно, уменьшению n_e, что и видно на рис.1. Анализ формулы (8) позволяет сделать вывод о том, что наиболее сильное нарушение фотохимического равновесия имеет место в условиях, когда $f^+\cong 1$, так как при $f^+\gg 1$ $\overline{\alpha}=\alpha_c$ и вариации f^+ не могут изменить $\overline{\alpha}$, а при $f^+\ll 1$ $\overline{\alpha}=\alpha_n$. В этом случае вариации n_e обусловлены температурной зависимостью α_n, менее сильной, чем для α_c. Подобная ситуация может имеет место в зимней среднеширотной мезосфере на высотах около 80 км [6].

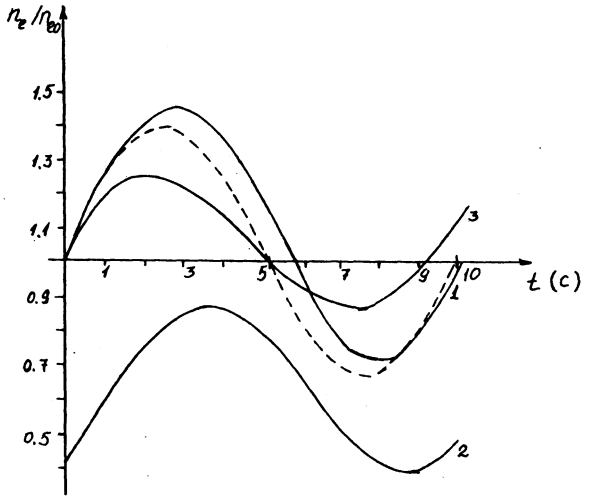

Рис. 3. Изменение относительной электронной концентрации во времени при прохождении волны с периодом $\tilde{T}=10$ с на высоте $h=80$ км и $h=60$ км. Штриховая линия - зависимость $\rho(t)/\rho_0$, линия 1 - $n_e(t)/n_{e0}$ при $0\le t\le\tilde{T}$, $h=80$км, линия 2 - $n_e(t)/n_{e0}$ при $99\tilde{T}\le t\le 100\tilde{T}$, $h=80$км, линия 3 - $n_e(t)/n_{e0}$ при $0\le t\le\tilde{T}$, $h=60$км.

В нижней части D-области ($h\cong 60$ км) имеют место следующие закономерности. Расчеты показали, что изменение относительных концентраций n^+ и n^- совпадает с изменением плотности в волне. В поведении относительной электронной концентрации n_e наблюдаются заметные отклонения, что иллюстрируется

кривой 3, рис.1. Так как на высоте $h=60$ км $n_e/n^- \ll 1$, то полученный результат не противоречит условию квазинейтральности атмосферы. Данный эффект также можно интерпретировать как нарушение фотохимического равновесия при прохождении АГВ. Одной из возможных причин этого является сильная зависимость скорости прилипания электронов к молекулам O_2 от плотности среды.

Предполагаемый механизм нарушения фотохимического равновесия при прохождении АГВ согласуется с результатами расчетов n_e/n_{eo} при прохождении акустических волн. Результаты соответствующих расчетов для волны с периодом 10 с приведены на рис.3. Видим, что на высоте 80 км нарушения фотохимического равновесия в одном периоде колебаний не происходит (кривая 1). Изменения относительной электронной концентрации повторяют изменения плотности среды. Это объясняется тем, что в данном случае характерное время химических процессов сравнимо с периодом акустической волны. Однако длительное воздействие акустического возмущения на ионосферу приводит к изменению относительного ионного состава D-области, а именно, к увеличению относительного содержания ионов-связок с большим коэффициентом диссоциативной рекомбинации, что приводит к уменьшению n_e (кривая 2). В то же время на высоте $h=60$ км, где характерные времена химических процессов много меньше периода волны, имеет место нарушение фотохимического равновесия уже на первом периоде колебаний (кривая 3).

Таким образом, проведенные исследования показали нарушение фотохимического равновесия в D-области ионосферы при прохождении акустической и акустико-гравитационной волны. Наблюдается эффект "отрыва" вариаций n_e/n_{eo} от ρ/ρ_o. При этом амплитуда вариации электронной концентрации на высоте 60 км в два раза меньше амплитуды колебаний плотности среды, а на высоте 80 км амплитуда вариаций $n_e(t)$ больше амплитуды колебаний плотности нейтрального газа. Это явление необходимо учитывать при анализе процессов, происходящих при воздействии на нижнюю ионосферу акустических и акустико-гравитационных волн. Оно может быть использовано как дополнительный источник верификации.

4. Нарушение фотохимического равновесия при разогреве атмосферы

Анализ детальных схем преобразования заряженных частиц в D-области показал, что температура атмосферы является одним из основных факторов, определяющих эффективность образования ионов-связок, и следовательно, величину электронной концентрации. Процессы образования ионов-связок имеют обратную зависимость от температуры, большинство обратных процессов теплового разрушения комплексов имеет прямую температурную зависимость [10]. В результате эффективные скорости образования связок имеют сильную обратную температурную зависимость.

Исследование влияния вариаций температуры нейтральной атмосферы на поведение параметров D-области проводилось следующим образом. Для летних и зимних условий мезосферы были рассчитаны фоновые значения n_{j0} концентраций заряженных частиц, входящих в модель. Расчеты проводились для заданных фоновых значений скоростей ионообразования и параметров нейтральной атмосферы. Далее в правую часть системы (1) вносились возмущения ΔT температуры среды T. В результате параметр T изменялся в следующих пределах: 150 K$<T<$ $<$270 K. Система (1) численно решалась с начальными условиями $n_j(0)=n_{j0}$ на временном интервале $0 \ll t \ll \hat{T}$. Время окончания счета $\hat{T}$ определялось из следующих соображений:

1) $\hat{T}$ не должно быть меньше времени установления фотохимического равновесия на заданной высоте,

2) $|n_j(\hat{T})-n_j(\hat{T}-\Delta t)|<0.001$ для $\Delta t=1$с.

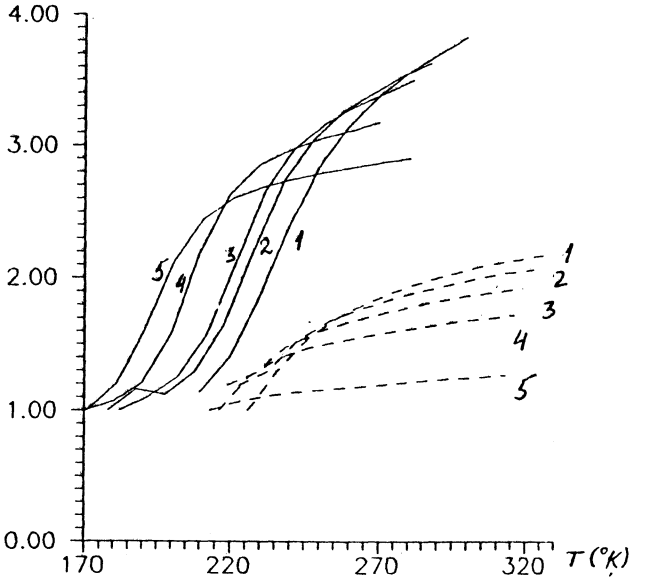

Рис.4. Изменение относительной электронной концентрации с ростом температуры. Сплошные линии - лето, штриховые - зима. 1 - h=74км, 2 - h=76км, 3 - h=78км, 4 - h=80км, 5- h=82км.

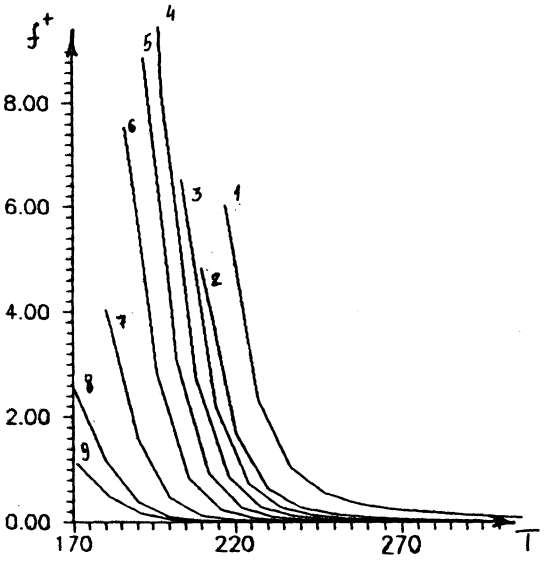

Рис.5. Изменение относительного содержания ионов-связок на различных высотах при разогреве D-области. 1 - h=68км, 2 - h=70км, 3 - h=72км, 4 - h=74км, 5 - h=76км, 6 - h=78км, 7 - h=80км, 8 - h=82км, 9 - h=84км для летних условий.

Результаты расчетов представлены на рис.4,5. Изменение относительной электронной концентрации n_e/n_{e0} с ростом температуры среды T показано на рис.4. Видно, что в условиях низких температур летней мезосферы (летом температура в мезосфере ниже, чем зимой) при разогреве атмосферы наблюдается увеличение электронной концентрации более чем в три раза. При более высоких зимних температурах эффект менее выражен. Это различие может быть объяснено следующим образом. При низких летних температурах на высотах около 80 км $f^+ \gg 1$, то есть преобладают ионы-связки, так как скорость их образования, в частности из первичного иона NO^+, имеет сильную обратную зависимость от температуры среды T (пропорционально $T^{-4.4}$) [6]. Скорость рекомбинации электронов с ионами-связками на один - два порядка выше, чем с простыми ионами NO^+, O_2^+. Расчеты показали, что с повышением температуры наблюдается рост относительных концентраций ионов NO^+, O_2^+. Одновременно наблюдается снижение относительного содержания ионов-связок (рис.5). Вследствие этого средняя скорость потерь электронов за счет диссоциативной рекомбинации снижается, что приводит к увеличению n_e. В зимних условиях, при более высоких температурах на высотах $h \cong 80$ км не наблюдается исходного существенного превышения ионов-связок над простыми ионами. Поэтому эффект роста n_e при разогреве атмосферы менее выражен.

5. Влияние вариаций концентраций МНС на ионизационно-рекомбинационный цикл

В высотном интервале 60 км $\leq h \leq$ 90 км рассматривались вариации концентраций таких МНС, как H_2O, $O(^3P)$, CO_2, далее обозначаемые x_j, и их влияние на величину среднего коэффициента диссоциативной рекомбинации $\bar{\alpha}$ и электронную концентрацию n_e. Невозмущенные значения скоростей ионообразования и параметров нейтральной атмосферы, в том числе H_2O, $O(^3P)$, CO_2, далее обозначаемых x_{j0}, задавались соответствующими двум часам дня зимнего равноден-

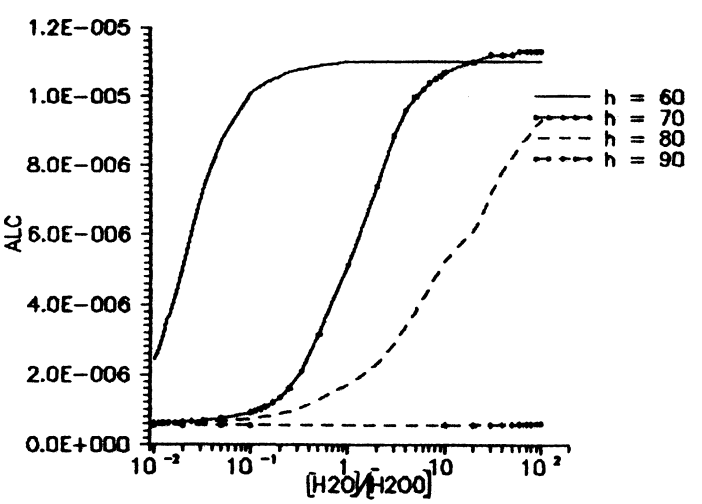

Рис.6. Поведение среднего коэффициента диссоциативной рекомбинации $\bar{\alpha}$ при изменениях концентрации H_2O.

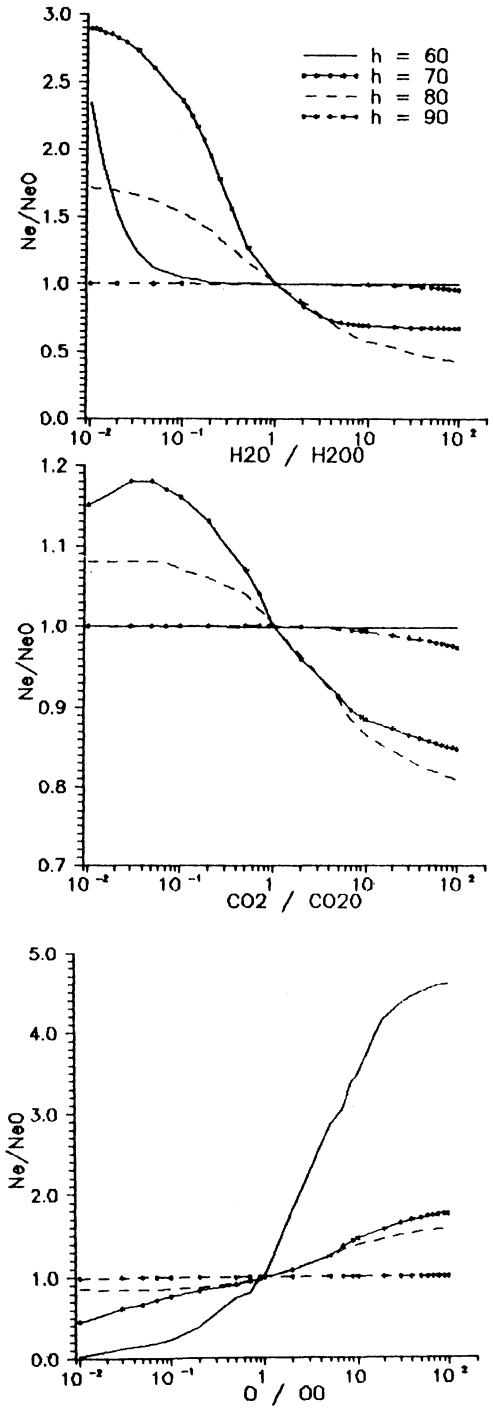

Рис.7. Изменение относительной электронной концентрации при вариациях концентрации: а) воды, б) углекислого газа, в) атомарного кислорода.

ствия среднеширотной атмосферы. Для этих же условий рассчитывались невозмущенные значения электронной концентрации n_{e0}. Далее в правую часть системы (1) вносились возмущения Δx_j, так что $0.01 \le (x_{j0}+\Delta x_j)/x_{j0} \le 100$. Система (1) численно решалась на временном интервале $0 \le t \le \hat{T}$ с начальными условиями $n_j(0)=n_{j0}$ и концентрациями нейтральных компонент $x_j=x_{j0}+\Delta x_j$. Выбор величины $\hat{T}$ описан в п.4. Результаты расчетов $\bar{\alpha}$ и n_e/n_{e0} представлены на рис.6.

В соответствии с используемой моделью ионизационно-рекомбинационного цикла, молекулы воды участвуют в процессах гидратации ионов, то есть в образовании кластеров. Поэтому увеличение концентрации H_2O приводит к увеличению относительного содержания ионов-связок f^+ и, следовательно, согласно (8), увеличению коэффициента $\bar{\alpha}$, что можно видеть на рис 6. Рост $\bar{\alpha}$ наиболее выражен на высотах 70–80 км, где в невозмущенных условиях $f^+ \cong 1$. На высоте 60 км, где в невозмущенных условиях $f^+ \gg 1$, увеличение скорости образования кластеров не может увеличить значения $\bar{\alpha}$. В случае уменьшения концентрации H_2O, наблюдается уменьшение $\bar{\alpha}$, что является следствием снижения скорости образования кластерных ионов с большими коэффициентами диссоциативной рекомбинации. Молекулы воды практически не участвуют в цепочке преобразования отрицательных ионов. Действительно, расчеты показали, что изменение концентраций воды практически не меняет величины соотношения $\bar{n}/n_e$. Таким образом, вариации n_e в рассматриваемом случае можно полностью объяснить изменением скорости гибели электронов в процессе диссоциативной рекомбинации. Результаты соответствующих расчетов электронной концентрации представлены на рис.7а. На рис.7б, 7в показано поведение электронной концентрации при изменении концентраций CO_2 и атомарного кислорода O. На высотах 70–80 км, образование кластерных ионов в канале NO^+, в рамках рассматриваемой модели, идет через промежуточные виртуальные ионы вида $NO^+(H_2O)_nCO_2$ [8]. Поэтому изменение концентраций CO_2 также приводит к изменению величин $\bar{\alpha}$ и, следовательно, n_e, что показано на рис.7б. Отсутствие изменений n_e на высоте 60 км, объясняется, в частности, тем, что на этой высоте образование кластерных ионов идет в основном через виртуальные ионы вида $NO^+(H_2O)_nN_2$. При фоновых скоростях ионизации роль канала O_2^+ существенна для образования кластеров только на высотах около 70 км. Расчеты показали, что вариации $\bar{\alpha}$ максимальны на высоте 70 км. Однако наиболее выраженный рост n_e имеет место на высоте 60 км (рис 7в). Это связано с увеличением скорости отлипания электронов от ионов O_2^- по реакции $O_2^- + O \rightarrow O_2 + O + e$.

Заключение

Построена модель, позволяющая описывать механизмы нарушения фотохимического равновесия *D*-области, возникающего в результате природных и антропогенных возмущений ионосферы, нижних слоев атмосферы и литосферы. Модель позволяет исследовать чувствительность ионосферных параметров к вариациям плотности, температуры и концентраций МНС атмосферы. Использованный нами подход позволяет связать данные натурных наблюдений, лабораторных и теоретических исследований и применить их для детального описания природных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Казаков В.В., Краснов В.М., Салихов Н.М. и др.* Волновые возмущения в атмосфере // Алма-Ата: Наука 1980, с. 65.
2. *Альперович Л.С., Гохберг М.Б., Гуфельд И.Л., Иванов Е.А., Кудрявцев В.П. и др.* // ДАН СССР, 1983, т. 269, №3, с. 573.
3. *Yeh K.C., Liu C.H.* // Rev. geophys. space phys., 1974, v. 12, №2, p. 193.
4. *Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Герасимович Е.А., Матвеев И.В.* Оперативные электромагнитные предвестники землетрясений. - М.: Наука, 1985.
5. *Гохберг М.Б., Гершензон Н.И., Гуфельд И.Л. и др.* // Геомагнетизм и аэрономия, 1984, т. 24, №2, с. 217.
6. *Данилов А.Д., Казимировский Э.С., Вергасова Г.В., Хачикян Г.Я.* Метеорологические эффекты в ионосфере. -Л.: Гидрометеоиздат, 1987, с. 269.
7. *Kopp E.* Positive and negative ions of the middle atmosphere // COSPAR, 1990.
8. *Кудрявцев В.П., Романюха Н.Ю.* Моделирование ионизационно-рекомбинационных процессов в средней атмосфере // Математическое моделирование, 1995, т. 7, №3, с. 3.
9. *Gear C.W.* DIFSUB for solution of ordinary differential equations. - Commun. A.C.M., 1971, v. 14, №3, p. 176.
10. *Reid G.* The production of water-cluster positive ions in the quite daytime D-region // Planet Space Sci., 1977, v. 25, p. 275.

Поступила в редакцию
25.03.96