

**ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИЙ ПРИБЛИЖЕННЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ  
НЕКОТОРЫХ ВОПРОСОВ АЭРОНОМИИ ОБЛАСТИ D ИОНОСФЕРЫ.  
III. ДЕТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФОТОХИМИИ СРЕДЫ  
В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННОГО УРОВНЯ ИОНИЗАЦИИ**

**A SEMI-EMPIRICAL APPROXIMATE METHOD FOR STUDYING SOME ISSUES  
OF AERONOMY OF THE IONOSPHERIC D-REGION.  
III. DETAILED ANALYSIS OF THE PHOTOCHEMISTRY  
OF THE ENVIRONMENT UNDER CONDITIONS OF INCREASED IONIZATION**

**С.И. Козлов**

*Институт динамики геосфер  
имени академика М.А. Садовского РАН,  
Москва, Россия, s\_kozlov@inbox.ru*

**А.Н. Ляхов**

*Институт динамики геосфер  
имени академика М.А. Садовского РАН,  
Москва, Россия, academ71@mail.ru*

**С.Ш. Николайшвили**

*Институт динамики геосфер  
имени академика М.А. Садовского РАН,  
Москва, Россия, ser58ge@mail.ru  
Институт прикладной геофизики  
имени академика Е.К. Федорова,  
Москва, Россия*

**В.В. Яким**

*Институт динамики геосфер  
имени академика М.А. Садовского РАН,  
Москва, Россия, 12-220@list.ru*

**S.I. Kozlov**

*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics RAS,  
Moscow, Russia, s\_kozlov@inbox.ru*

**A.N. Lyakhov**

*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics RAS,  
Moscow, Russia, academ71@mail.ru*

**S.Sh. Nikolaishvili**

*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics RAS,  
Moscow, Russia, ser58ge@mail.ru  
Fedorov Institute of Applied Geophysics,  
Moscow, Russia*

**V.V. Yakim**

*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics RAS,  
Moscow, Russia, 12-220@list.ru*

**Аннотация.** В рамках предложенного ранее полуэмпирического метода (Козлов и др., 2022; Козлов, Николайшвили, 2024), представляющего из себя достаточно простую математическую модель (систему из пяти алгебраических уравнений для расчета концентраций первичных и кластерных положительных ионов, первичного и сложных отрицательных ионов, а также электронной плотности), выполнены расчеты аэрономических параметров ионосферы, определяющих поведение области D в условиях повышенного уровня ионизации (солнечные протонные события (СПС) 2–5 ноября 1969 г. и высотный ядерный взрыв (ВЯВ), проведенный в 1962 г.).

Детальный анализ полученных значений параметров показал, что результаты расчетов не противоречат общепринятым фотохимическим механизмам, имеющим место в рассматриваемых условиях СПС и ВЯВ. Определены основные тенденции в изменениях этих параметров. Сделан вывод о возможности использования полуэмпирического метода в различных гелиогеофизических условиях и необходимости разработки модели для переходного времени суток (утренних и вечерних сумерек), а также намечены некоторые возможные направления дальнейших исследований.

**Abstract.** Using the previously proposed semi-empirical method (Kozlov et al., 2022; Kozlov, Nikolaishvili, 2024), which is a fairly simple mathematical model (a system of five algebraic equations for calculating the concentrations of primary and cluster positive ions, primary and complex negative ions, as well as the electron density), we have calculated the ionospheric parameters that determine the behavior of the D-region under conditions of increased ionization (Solar Proton Events (SPE) on November 2–5, 1969, and the High-altitude Nuclear Explosion (HANE) conducted in 1962).

Detailed analysis of the obtained parameter values has shown that the calculation results do not contradict the generally accepted photochemical mechanisms occurring under the SPE and HANE conditions considered. We identified the main trends in the changes of these parameters. A conclusion is made about the possibility of using the semi-empirical method in various heliogeophysical conditions and the need to develop a model for the transitional time of day (morning and evening twilight), and some possible directions for further research are outlined.

**Keywords:** lower ionosphere, missile launch, aeronomy, inverse problem.

**Ключевые слова:** нижняя ионосфера, запуск ракет, аэрномия, обратная задача.

## ВВЕДЕНИЕ

В [Козлов, Николайшвили, 2024] приводятся результаты обработки (калибровки) по экспериментальным данным полуэмпирического метода [Козлов и др., 2022] исследования некоторых вопросов аэрномии возмущенной и спокойной области D ионосферы. Особый интерес вызывает обработка метода, представляющего из себя достаточно простую математическую модель (система из пяти алгебраических уравнений для расчета концентраций первичных  $X_1^+$  и кластерных  $X_2^+$  положительных ионов, первичного  $X_1^- \equiv O_2^-$  и сложных  $X_2^-$  отрицательных ионов, а также электронной плотности  $N_e$ ), по данным, полученным по время солнечных протонных событий (СПС) 2–5 ноября 1969 г. [Ulwick, 1972] и ночного американского высотного ядерного взрыва (ВЯВ) 1962 г. [Whitten et al., 1965], когда одновременно измерялись высотные распределения  $N_e(h)$  и скорости ионизации атмосферы  $q(h)$ . Эти измерения позволили количественно оценить точность расчетов, внести в модель целый ряд усовершенствований и сформулировать предложения по использованию полуэмпирического метода в различных гелиогеофизических ситуациях. К сожалению, из-за требований по объему статьи в [Козлов, Николайшвили, 2024] не обсуждается известная проблема (см., например, [Swider, 1977; Козлов, 2021]) о возможности изменений концентраций малых нейтральных и возбужденных компонент, влияющих на  $N_e$  во время СПС и ВЯВ (в модели это  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $O_3$ ); не проведено сравнение расчетов с экспериментальными данными по каждому запуску ракет с использованием параметра  $\alpha = q/N_e^2$ , хотя был сделан вывод о целесообразности такого сравнения; отсутствует полный анализ весьма информативных характеристик среды:

$$\lambda(q, h) = \left( [X_1^-] + [X_2^-] \right) / N_e,$$

$$\phi^+(q, h) = [X_2^+] / [X_1^+],$$

$$\phi^-(q, h) = [X_2^-] / [X_1^-],$$

$$\alpha_{эфф}(q, h) = q / [N_e^2 (1 + \lambda)],$$

$$A(q, h) = [X_1^+] + [X_2^+] = N_e + [X_1^-] + [X_2^-],$$

$$\alpha(q, h) = q / (2A^2);$$

недостаточно обоснован выбор неизвестных параметров модели — скорости фотоотщипания  $I_2$  от  $X_2^-$  и коэффициента диссоциативной рекомбинации  $\alpha_{d2}$  иона  $X_2^+$ . Отдельного исследования требует обнаруженный в экспериментах эффект падения  $N_e$  при  $q \approx (1.8 \div 2.0) 10^2 \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$  на всех высотах.

Рассмотрению сформулированных вопросов и посвящена настоящая статья. Анализируемые результаты расчетов получены на четвертом этапе обра-

ботки метода (см. табл. 4 в [Козлов, Николайшвили, 2024]).

## 1. О ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ МАЛЫХ НЕЙТРАЛЬНЫХ И ВОЗБУЖДЕННЫХ КОМПОНЕНТ D-ОБЛАСТИ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННОГО УРОВНЯ ИОНИЗАЦИИ

Как отмечалось, в методе используются только три малые составляющие среды:  $H_2O$ ,  $CO_2$  и  $O_3$ , концентрации которых в диапазоне высот 50–85 км известны с невысокой точностью [Козлов и др., 2022] и зависят от широты, сезона, времени суток и солнечной активности. Однако в контексте настоящей статьи наиболее важным представляется понять, могут ли измениться распределения  $H_2O(h)$ ,  $CO_2(h)$  и  $O_3(h)$  в условиях повышенного уровня ионизации D-области и как учитывать этот эффект, если он будет иметь место, в полуэмпирической модели?

В общем случае сформулированную проблему можно решить с помощью многокомпонентных моделей типа [Swider, 1977; Swider et al., 1978; Read, 1977; Мак-Ивен, Филипс, 1978; Козлов, 2021]), в которых одновременно рассчитываются концентрации ионизированных компонент и малых нейтральных и возбужденных составляющих ионосферы. Включение дополнительных уравнений в модель приведет к еще большему увеличению количества неопределенных параметров и в целом выхолостит полуэмпирический метод, в котором заложена принципиальная идея: для исследования многих вопросов фотохимии D-области в квазистационарных условиях необходим только экспериментальный профиль  $N_e(h)$ . Однако из этой ситуации можно выйти, если использовать результаты исследований вышеупомянутых (и других аналогичных) работ, а также соотношение, указывающее на необходимость учета изменения фоновой концентрации  $N_{i0}$  той или иной малой компоненты  $i$  за время  $t_u$  действия источника ионизации [Козлов, 2021]:

$$W \int_0^{t_u} q(h, t) dt \gtrsim \frac{3}{2} k \int_0^{t_u} T(h, t) N_{i0}(h, t) dt, \quad (1)$$

где  $T$  — температура среды;  $W \approx 33 \div 35$  эВ — хорошо известная энергия, идущая на образование одной пары ионов. В определенном смысле соотношение (1) имеет универсальный характер. Если оно не выполняется из-за того, что действие источника ионизации может быть как угодно растянуто во времени или его мощность относительно невелика, говорить о постоянстве концентрации той или иной малой компоненты  $N_{i0}$  все равно нельзя, так как в левой его части стоит полная энергия, вносимая ионизирующим излучением в среду, а в правой — только энергия, «запасенная» в  $N_{i0}$  в предположении максвеллов-

Таблица 1

Зависимость  $[O_3]_0$ ,  $T$ ,  $E_0$ ,  $\bar{q}_s$  и  $t_u$  от высоты  $h$

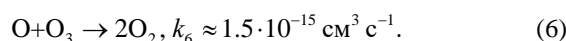
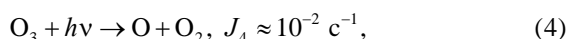
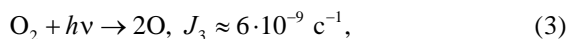
$h$ , км	$[O_3]_0$ , см <sup>-3</sup>	$T$ , °К	$E_0$ , эВ·см <sup>-3</sup>	$\bar{q}_s$ , см <sup>-3</sup> с <sup>-1</sup>	$t_u$ , с
50	2.9319 E+10	262.5	1.000 E+09	2.10 E+02	1.443 E+05
55	9.3131 E+09	247.8	2.980 E+08	2.52 E+02	3.583 E+04
60	4.0335 E+09	237	1.220 E+08	2.01 E+02	1.839 E+04
65	1.6642 E+09	218.6	4.700 E+07	1.92 E+02	7.418 E+03
70	7.4945 E+08	203.7	2.000 E+07	1.58 E+02	3.836 E+03
75	3.7029 E+08	196.1	9.400 E+06	1.41 E+02	2.020 E+03
80	4.7035 E+08	193.1	1.200 E+06	1.25 E+02	2.909 E+02
85	1.7259 E+08	183.4	4.100 E+06	1.41 E+02	8.812 E+02

ского распределения всех нейтральных компонент по скоростям. При  $t_u$  много меньше характерного времени  $t_x(N_{i0})$  изменения концентрации малой составляющей в естественных условиях можно отказаться от интегрирования в (1). Даже при  $t_u \geq t_x(N_{i0})$  всегда для какой-нибудь компоненты найдется промежуток времени, когда вполне оправданно считать концентрации  $N_{i0}$  и тем более  $T(h)$  постоянными. В описанных ситуациях

$$Wq(h)t_u \gtrsim \frac{3}{2}kT(h)N_{i0}(h), \quad (2)$$

Значения  $t_x[H_2O]$  и  $t_x[CO_2]$  в D-области на любых широтах и высотах достаточно велики, так как  $[H_2O]$  и  $[CO_2]$  прежде всего определяются источниками на земле и в нижележащих слоях атмосферы, а также динамическими процессами. Это подтверждается расчетами на различных многокомпонентных моделях (см. вышеприведенные ссылки) в условиях повышенного уровня ионизации: концентрации  $[H_2O](h)$  и  $[CO_2](h)$  практически не изменялись. Такие же результаты получаются и при использовании многокомпонентной модели [Gordillo Vazquez, 2008; Van Gaens, Bogaerts, 2013] (77 компонент, 221 реакция для ионизированных составляющих и 304 процесса для нейтральных).

Для оценки  $t_x(O_3)$  мы основываемся на известном кислородном цикле Чепмена, подробно исследованном во многих работах, включая [Перов, Хргиан, 1980]. Безусловно, он является основным на рассматриваемых высотах, значительно превышающих максимум в распределении  $[O_3](h)$ . Если опустить некоторые детали [Козлов, 2021], цикл включает четыре главных процесса



Справа даются средние значения на  $h=55\div 90$  км скоростей фотодиссоциации и констант скоростей реакций, полученные на основании обобщения детальных расчетов [Перов, Хргиан, 1980], выполненных для средних широт и примерно полуденных условий ( $\sec\chi=2$  или зенитный угол Солнца  $\chi=60^\circ$ ).

Запуски № 1–6 (см. табл. 1 в [Козлов, Николайшвили, 2024]) были проведены на широте  $59^\circ$  N, т. е. на границе перехода от среднеширотной к полярной ионосфере, и при  $\chi \geq 75^\circ$ . Учет этих факторов приведет к значительному снижению  $J_3$  и  $J_4$ , следовательно, к увеличению времени изменения (жизни)  $O_3$  по реакции (4). Оценка  $t_x(O_3)$  по (5) и (6) требует знания  $[O](h)$ ,  $[O_2](h)$ ,  $[M](h)$ . Характерное время изменения  $O_3$  по (5) составляет  $(0.21k_5[M]^2)^{-1}$ , но правильнее  $(0.21k_5[O][M])^{-1}$ . В нижней части D-области ( $h < 60$  км) из-за весьма низкой концентрации атомарного кислорода значения  $t_x(O_3)$  очень велики. Аналогичная ситуация имеет место и на  $h > 60$  км, где  $[O]$  возрастают, а  $[M]$  падают, но всегда  $[O] < 0.21[M]$ . Временные вариации  $O_3$  в результате протекания процесса (6) определяются выражением  $(k_6[O])^{-1}$  и даже при  $[O] \approx 10^9 \div 10^{10} \text{ см}^{-3}$  на  $h > 70$  км дают  $t_x(O_3) \approx 6.7 \cdot 10^4 \div 6.7 \cdot 10^5$  с. Это достаточно большие величины. Полученные результаты позволяют в дальнейшем использовать выражение (2).

Вернемся к рассматриваемым здесь СПС. Сначала для дневного распределения  $[O]_0(h)$ , найденного по экспериментальным данным ИСЗ «Ауга», была определена энергия  $E_0(h)$ , содержащаяся в озоне. Затем по экспериментальным данным табл. 2 из [Козлов, Николайшвили, 2024] найдены средние скорости  $\bar{q}_s$  на каждой высоте  $h$  и далее по уравнению

$$t_u(h) = E_0(h) / W \bar{q}_s(h) \quad (7)$$

оценены времена, когда вносимая энергия при СПС сравняется с  $E_0(h)$ . Значения  $[O_3]_0$ ,  $T$ ,  $E_0$ ,  $\bar{q}_s$  и  $t_u$  приведены в табл. 1. Отметим, что  $\bar{q}_s(h)$  отличаются друг от друга максимально всего на фактор  $\sim 1.8$ . На самом деле значения  $t_u$  должны быть больше, так как коэффициент  $W$  включает энергию, идущую не только на ионизацию воздуха, но и на диссоциацию молекул и различного типа возбуждение нейтральных и ионизированных компонент. Следовательно, энергия, приводящая к изменениям в  $O_3$ , должна быть меньше. Данное соображение подтверждается расчетами [Смирнова и др., 1984] по 30-компонентной модели: на  $h=70$  км при внесенной энергии  $1.2 \cdot 10^8$  эВ·см<sup>-3</sup> ( $W=33$  эВ,  $q=10^3$  см<sup>3</sup>с<sup>-1</sup>,  $t_u=3.6 \cdot 10^3$  с) было обнаружено, что она соответствует началу изменений в малых кислородных компонентах при начальных значениях  $T \approx 220$  К и  $[O_3]_0 \approx 10^{10}$  см<sup>-3</sup>. Для данных  $T$

и  $[O_3]_0$  энергия, запасенная в озоне согласно (1)  $E_0=2.6 \cdot 10^8$  эВ·см<sup>-3</sup>, откуда величина  $W(O_3)$ , приводящая к вариациям  $O_3$  оказалась равной  $W(O_3)=33 \cdot 1.2 \cdot 10^8/E_0 \approx 14.1$  эВ. Эту оценку качественно подтверждают расчеты по упомянутой выше 77-компонентной модели при тех же значениях  $T$ ,  $[O_3]_0$  и  $\bar{q}_3$  (см. табл. 1), а на  $h > 70$  км величины  $t_u$  практически совпадают. При этом на всех высотах концентрации  $[O_3]$  падают относительно  $[O_3]_0$ ,  $W(O_3) < 33$  эВ; в нижней части D-области ( $h \leq 65$  км) уменьшение  $[O_3]$  не превышает ~5–7 %, в верхней может достигать ~25 %. В целом расчеты согласуются с ранее выполненными (см. [Козлов, 2021]).

Проведенный анализ позволяет рекомендовать принять для рассматриваемых СПС на  $h \leq 65$  км  $[O_3]_0 \approx const$ , на  $h > 65$  км  $[O_3] \approx (0.75 \div 0.8)[O_3]_0$ . В обоих случаях необходим учет изменений  $[O_3]_0(h)$  в зависимости от времени суток. Заметим, что роль отрицательных ионов, связанных с  $O_3$ , на больших высотах заметно уменьшается. Расчеты

$$\Delta q = (q_3 - q_m) / q_m, \Delta N_e = (N_{e3} - N_{em}) / N_{em}, \quad (8)$$

где индекс «э» относится к экспериментальным значениям, а «м» — к модельным, «не почувствовали» на  $h > 65$  км рекомендованных изменений в  $[O_3]$ .

## 2. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СООБРАЖЕНИЯ ПРИ ВЫБОРЕ НЕИЗВЕСТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ СКОРОСТЕЙ ФОТООТЛИПАНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ОТ $X_2^-$ И КОЭФФИЦИЕНТА ДИССОЦИАТИВНОЙ РЕКОМБИНАЦИИ $X_2^+$ С ЭЛЕКТРОНАМИ

При сопоставлении экспериментальных медианных величин  $\alpha_3(h) = q_3(h) / N_{e3}^2(h)$  с аналогичными теоретическими расчетами, когда в модель были включены температурные зависимости констант скоростей реакций, новое значение  $I_1 = 2.44$  с<sup>-1</sup> скорости фотоотлипания электронов от  $O_2^-$  [Козлов, Ляхов, 2023], а распределение  $T(h)$  взято по модели MSIS-90, получено практически идеальное согласие между  $\alpha_3$  и  $\alpha_m$  (см. рис. 6 в [Козлов, Николайшвили, 2024]) со значениями  $I_2$  и  $\alpha_{d2}$ , представленными в табл. 2. Расчеты  $\alpha_{d2}$  проводились по гипотетическому уравнению, предложенному в [Козлов, Николайшвили, 2024],

$$\alpha_{d2} = 2 \cdot 10^{-6} (300/T)^{0.5} \quad (9)$$

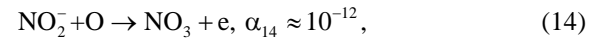
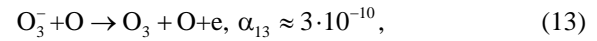
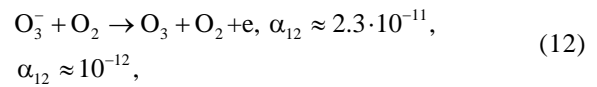
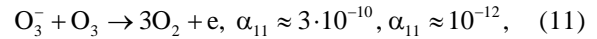
с коэффициентами 0.2 на  $h \leq 65$  км и 0.33 на  $h > 65$  км. Приведенные в табл. 2. величины, оцененные отчасти интуитивно, требуют дополнительного пояснения. Значения  $\alpha_{d2}(h)$  незначительно изменяются в рассматриваемом диапазоне высот. Среднее значение  $\alpha_{d2} = 6.1 \cdot 10^{-7}$  см<sup>3</sup>с<sup>-1</sup>.

Более сложно объяснить высокие значения  $I_2$ . В [Козлов, Николайшвили, 2024] было высказано желание учитывать в  $I_2$  также процессы отлипания

электронов от  $X_2^-$  в соударениях с нейтральными компонентами, находящимися в основном и возбужденном состоянии. В данном случае

$$I_2 = I_\Phi + \alpha_i [M_j], \quad (10)$$

где первый член относится к фотоотлипанию, а второй — к отлипанию в соударениях  $i$  с участием нейтральной компоненты  $j$ . К сожалению, наши знания о константах скоростей  $\alpha_i$  этих процессов весьма ограничены и достаточно сомнительны [Боярчук и др., 2006; Swider, 1977; Месси, 1979; Смирнов, 1978, 1983; Saidia et al., 2019]. Анализ этих и многих других работ справочного и научного характера показал, что можно обратить внимание лишь на несколько реакций



причем в разных публикациях для одного и того же процесса даются разные значения  $\alpha_i$ , например, для (11) и (12). Из (11)–(14) видно, что реакция (12) даже при  $\alpha_{12} \approx 10^{-12}$  см<sup>3</sup>с<sup>-1</sup> на всех высотах дает  $10^{-12}[O_2] = J_2$ , представленных в табл. 2. Но ион  $O_3^-$  по любым многокомпонентным моделям считается промежуточным между первичным  $O_2^-$  и неизвестным конечным  $X_2^-$  [Козлов, 2021; Swider, 1977; Митра, 1977]. С учетом результатов, полученных в упомянутых исследованиях, часто принимают, что ионами  $X_2^-$  могут быть  $CO_3^-$ ,  $NO_2^-$ ,  $NO_3^-$ , гидратные ионы. Поэтому для дальнейших оценок, которые безусловно будут иметь приближенный характер, целесообразно основываться только на реакции (14), зависящей от концентраций  $[O](h)$ . Значения  $[O](h)$  растут с увеличением высоты, однако на  $h \geq 50$  км весьма изменчивы и зависят от солнечной активности, времени суток, сезона, широты. Чтобы удовлетворить величинам  $I_2$  табл. 2 необходимы  $[O] = (I_2 - I_\Phi) / \alpha_{14}$ . Приняв  $I_\Phi = 0.04$  с<sup>-1</sup>, как и на первых этапах отработки полуэмпирического метода [Козлов, Николайшвили, 2024], для диапазона  $I_2 = 0.2 \div 1$  с<sup>-1</sup> получаем  $[O] = (2 \div 9.6) \cdot 10^{11}$  см<sup>-3</sup>. Анализ экспериментальных и теоретических работ [Зуев, Комаров, 1986; Журавлева, Кудрявцев, 1994; Shimazaki, Laird, 1972], где в той или иной степени рассматривалось распределение  $[O](h)$ , показывает, что найденные значения  $[O]$  вполне возможны, тем более в условиях продолжительного повышенного уровня ионизации, характерного для СПС, в результате диссоциации прежде всего  $O_2$  и  $O_3$  [Swider, 1977; Смирнова и др., 1984]. Кроме того, следует еще раз отметить наши недостаточные знания о  $I_\Phi$  и  $\alpha_{14}$ , о чем упоминалось выше (см. также [Козлов и др., 2022; Козлов, Николайшвили, 2024]), и возможность уменьшения  $I_2$  табл. 2, оставаясь в рамках принципиального соображения — расчеты

Таблица 2

Значения  $I_2$  и  $\alpha_2$ , давшие наилучшее согласие между  $\alpha_M$  и  $\alpha_3$

$H, \text{ км}$	50	55	60	65	70	75	80	85
$I_2, \text{ с}^{-1}$	1	1	0.5	0.2	0.8	0.8	0.8	0.8
$\alpha_{d2} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$	$4.4 \cdot 10^{-7}$	$4.4 \cdot 10^{-7}$	$4.4 \cdot 10^{-7}$	$4.5 \cdot 10^{-7}$	$7.7 \cdot 10^{-7}$	$7.7 \cdot 10^{-7}$	$7.8 \cdot 10^{-7}$	$7.8 \cdot 10^{-7}$

Таблица 3

Общая характеристика запусков ракет (Форт Черчил,  $58^\circ 44' \text{ N}$ ,  $93^\circ 49' \text{ W}$ )

Условный номер пуска	Дата, местное время	Зенитный угол Солнца	Высоты измерений $H$ (км)	Время суток на высотах $H$
1	02.11.69 15:10	$83^\circ$	44–105	день
2	03.11.69 06:57	$96^\circ$	64–105	день
3	03.11.69 07:30	$92^\circ$	60–112	день
4	03.11.69 12:54	$75^\circ$	56–108	день
5	04.11.69 15:30	$85^\circ$	54–103	день
6	04.11.69 16:38	$93^\circ$	57–108	день
7	1962 нет данных	нет данных	50–80	ночь

и эксперимент неплохо согласуются между собой, если первые попадают в диапазон инструментальной точности измеряемых величин.

### 3. АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ДРУГИХ АЭРОНОМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЫСОТЫ И СКОРОСТИ ИОНИЗАЦИИ АТМОСФЕРЫ

Опыт исследования области D с повышенным уровнем ионизации показывает [Козлов, 2021], что наиболее важным и интересным является рассмотрение зависимостей отмеченных во введении параметров  $\lambda$ ,  $\varphi^-$ ,  $\alpha_{\text{эф}}$ ,  $\alpha_i$ ,  $\varphi^+$ ,  $A(h)$  от  $q$ . Результаты расчета этих параметров показаны на рис. 1–6. Цифры около точек обозначают условные номера запусков ракет во время СПС и ночного ВЯВ. Минимальная информация по сравнению с [Козлов, Николайшвили, 2024] об этих запусках дается в табл. 3.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие основные выводы.

1. Как и следовало ожидать, значения обсуждаемых параметров, за исключением  $A$ , сильно зависят от высоты. При этом диапазон  $h$  можно разбить на два:  $h \leq 65$  км и  $h > 65$  км.

2. Аэрномия D-области с повышенным уровнем ионизации в ночных условиях, по-видимому, заметно отличается от дневных условий. Не представляется возможным сделать более детальный и обоснованный вывод, так как он основан на единственных ночных экспериментальных данных, полученных во время ВЯВ (величины  $q_s$  и  $N_{es}$  оказались значительно больше дневных).

3. Поведение параметра  $\lambda(q, h)$  определяется прежде всего  $h$  (см. рис. 1). Естественно, значения  $\lambda(q, h)$  падают с увеличением высоты. Диапазон изменений  $\lambda$  в нижней части D-области ( $h \leq 65$  км)  $1 < \lambda < 10^2$  примерно в десять раз меньше по сравнению с  $h > 65$  км. Наиболее интересный результат — независимость дневных  $\lambda$  от  $q$  на всех высотах, во всяком случае, в рамках рассматриваемых значений  $q \leq 2 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ .

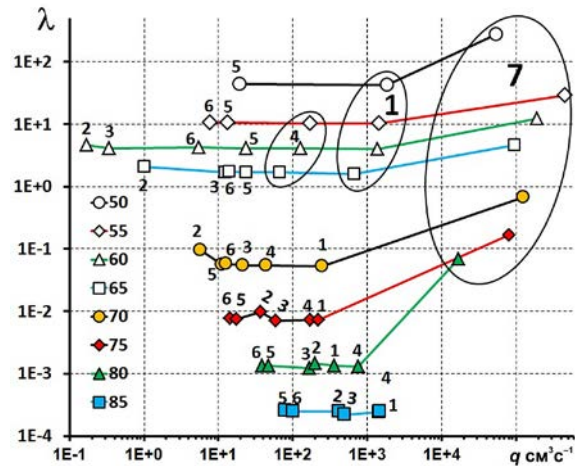


Рис. 1. Поведение параметра  $\lambda$  в зависимости от скорости ионизации  $q$  и высоты  $h$ . Цифры около кривых — номера запусков. Каждая линия соответствует значениям параметра на высотах 50–85 км. В легендах показаны цвета и маркеры линий, а также соответствующие значения высот в километрах

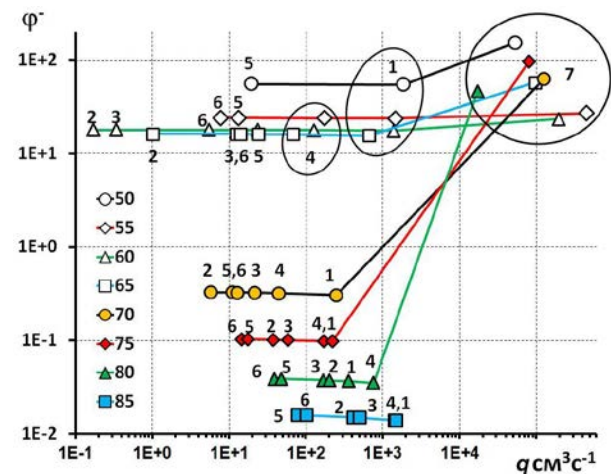


Рис. 2. Поведение параметра  $\varphi^-$  в зависимости от скорости ионизации  $q$  и высоты  $h$

4. На рис. 2 и 3 показаны вариации параметра  $\varphi^-$  и коэффициента  $\alpha_{\text{эф}}$  соответственно в зависимости

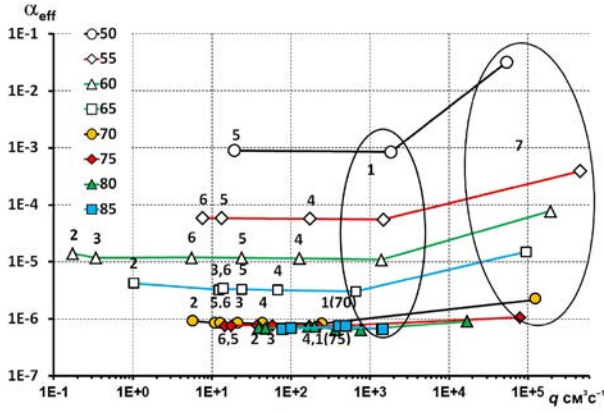


Рис. 3. Поведение коэффициента  $\alpha_{\text{эфф}}$  в зависимости от скорости ионизации  $q$  и высоты  $h$

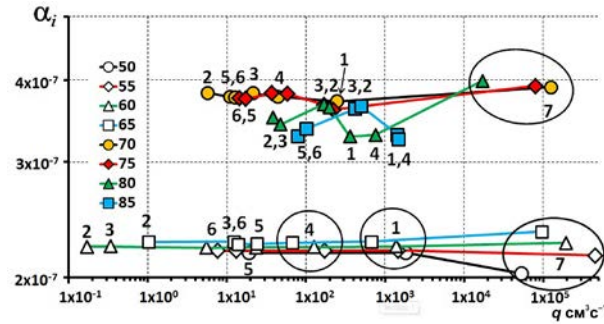


Рис. 4. Поведение коэффициента  $\alpha_i$  в зависимости от скорости ионизации  $q$  и высоты  $h$

от  $q$  и  $h$ . Поведения этих параметров весьма похоже на  $\lambda(q, h)$ : на всех высотах  $h$  зависимость от  $q$  отсутствует. Главное различие имеет место только для  $\alpha_{\text{эф}}$  на  $h > 65$  км: днем его можно считать постоянным и равным  $\sim 10^{-6} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$  (несколько неожиданный результат, который станет понятен при рассмотрении зависимости  $N_e(q, h)$  в подразделе 4).

5. Влияние  $q$  и  $h$  на значение коэффициента ион-ионной рекомбинации  $\alpha_i$  иллюстрирует рис. 4. Видно, что ночные значения  $\alpha_i$  хорошо сопрягаются с дневными (запуски № 1–6). Напомним [Козлов и др., 2022], что решение системы из пяти дифференциальных уравнений было возможным в предположении, что  $\alpha_i = \alpha_{d1}(X_1^+)$  и  $\alpha_i = \alpha_{d2}(X_2^+)$ , и, следовательно:

$$\alpha_i = \frac{\alpha_{d1}(X_1^+) + \alpha_{d2}(X_2^+)}{2[X_1^+] + [X_2^+]} = \frac{\alpha_{d1} + \alpha_{d2}f^+}{2(1+f^+)} = \frac{q}{2A^2}. \quad (15)$$

Это уравнение, по сути, и определяет поведение  $\alpha_i(q, h)$ . На  $h \leq 65$  км среднее значение  $\alpha_i \approx 2.1 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$  не зависит от  $h$  и, по-видимому, от времени суток и действительно относится к реакциям рекомбинации отрицательных и положительных ионов. На  $h > 65$  км, несмотря на некоторый разброс, среднее значение  $\alpha_i \approx 3.5 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$  и относится к реакциям диссоциативной рекомбинации положительных ионов с электронами. Вывод о независимости  $\alpha_i$  от времени суток, безусловно, является предварительным. Сравнение найденных средних  $\alpha_i$  с величинами

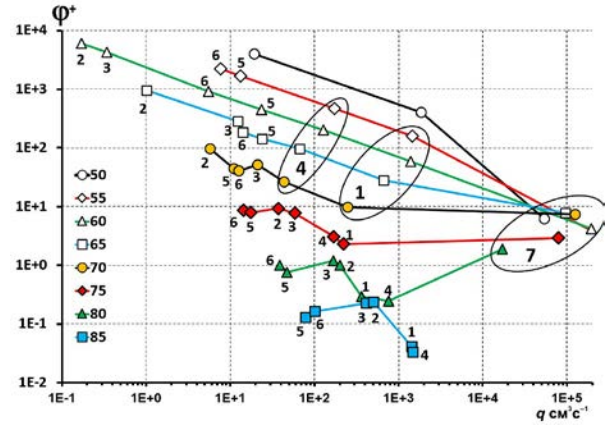


Рис. 5. Поведение параметра  $\phi^+$  в зависимости от скорости ионизации  $q$  и высоты  $h$

нами  $\alpha_{d2}$  из табл. 2 показывает, что общие тенденции поведения  $\alpha_i$  и  $\alpha_{d2}$  — независимость от  $q$  и увеличение с ростом  $h$  — одинаковы. Однако по абсолютным величинам  $\alpha_i$  меньше  $\alpha_{d2}$  примерно в два раза.

6. Вариации отношения  $\phi^+(q, h)$  показаны на рис. 5. Они существенно зависят от  $q$  и  $h$ . Ночные значения ВЯВ не сопрягаются с дневными и поэтому в дальнейшем не обсуждаются. С ростом  $q$  и  $h$  значения  $\phi^+$  ожидаемо уменьшаются. Днем на  $h \leq 65$  км падение  $\phi^+$  обратно пропорционально  $q$ , на  $h > 65$  км эта зависимость пропадает (результаты для пусков № 2 и 3 выделяются на фоне остальных). Выполняются неравенство  $[X_1^+] \geq [X_2^+]$  начинает только на  $h \geq 80$  км.

7. На рис. 6 приведена зависимость условия электронейтральности среды (параметра  $A$ ) от скорости ионизации  $q$  и высоты  $h$ . Видно, что значения  $A$  практически не зависят от высоты и определяются только  $q$ . Рост  $q$  приводит к увеличению концентраций  $[X_1^+]$  и  $N_e$ . В свою очередь, увеличение  $N_e$  приводит к росту  $[X_1^-]$ , а рост  $[X_1^+]$  вызывает рост  $[X_2^+]$ .

#### 4. АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ МОДЕЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ $N_{\text{ем}}(q, h)$ И $q_m(N_e, h)$

Напомним [Козлов, Николайшвили, 2024], что модельные (рассчитанные) значения  $N_{\text{ем}}$  и  $q_m$  получаются подстановкой экспериментальных значений  $q_0$  и  $N_{e0}$  в соответствующие уравнения. Согласие расчетов с экспериментом считается удовлетворительным, если результаты расчетов укладываются в диапазон инструментальной точности измерений. Такой подход позволяет для каждой высоты  $h$  проанализировать зависимости  $N_{\text{ем}}(q_0)$ , а также  $q_m(N_{e0})$ .

Наилучшее согласие расчетов с экспериментом получено при следующих параметрах модели [Козлов, Николайшвили, 2024]:  $i_2$  и  $\alpha_{d2}$  — см. табл. 2;  $i_1 = 2.44 \text{ с}^{-1}$ ; концентрации нейтральных составляющих взяты по экспериментальным данным ИСЗ «Ауга»; значения температуры по модели MSIS; выражения для  $\alpha_{d1}$  и  $\beta$  приведены в [Козлов, Николайшвили, 2024].

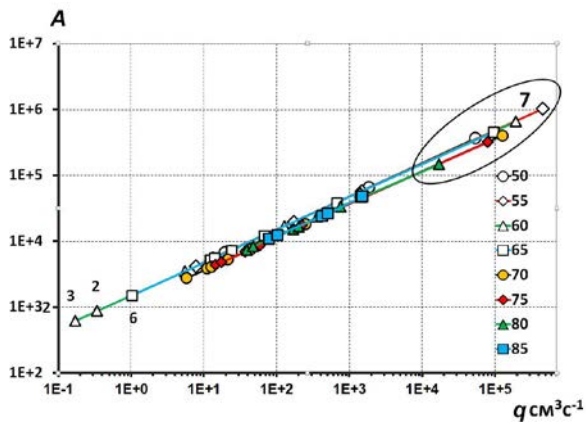


Рис. 6. Поведение параметра  $A$  D-области ионосферы в зависимости от скорости ионизации  $q$  и высоты  $h$

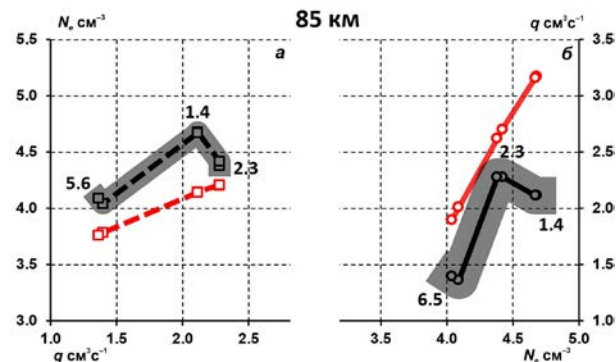


Рис. 7. Зависимость  $N_{ем}$  от  $q_3$  (а) и  $q_M$  от  $N_{е3}$  (б) на высоте  $h=85$  км. Черные линии — экспериментальные кривые, красные — модельные. Цифры около кривых — номера запусков

Результаты расчетов  $N_{ем}$  и  $q_M$  позволяют сделать следующие выводы.

1. Модельные значения  $N_{ем}$  и  $q_M$  для пусков № 1, 4, 5 и 6 укладываются в диапазон точности измерений для высот  $h \leq 75$  км. Результаты для пусков № 2, 3 на этих высотах в диапазон не укладываются, при этом отклонение расчета от эксперимента уменьшается по мере увеличения высоты. Можно предположить, что, скорее всего, это связано с тем, что пуски № 2, 3 были осуществлены в утренние сумерки, т. е. во время перестройки ионосферных процессов от ночных к дневным (электронная концентрация  $N_e$  не успевает за увеличением  $q$ ).

2. Для высоты  $h \geq 80$  км картина меняется (рис. 7, а, б,  $h=85$  км, сплошная линия —  $q_M(N_{е3})$ , штриховая —  $N_{ем}(q_3)$ , серым цветом показаны экспериментальные данные, толщиной соответствует диапазону точности измерений, красным цветом отображены результаты расчетов). Значения  $q_M > q_3$  в 3–10 раз, в то же время  $N_{ем} < N_{е3}$  в 1.5–3 раза. Более-менее корректные модели D-области для условий перехода ночь–день и день–ночь, по нашему мнению, отсутствуют. Поэтому весьма актуальной становится разработка подобной модели, что выходит за рамки данной статьи.

Отметим, что полученные в пусках № 1, 4, 5 и 6 экспериментальные значения и модельные оценки, хорошо согласующиеся между собой, можно аппроксимировать линейными функциями [Пановский, Брайер, 1972].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Детальный анализ результатов расчетов параметров  $\lambda$ ,  $\phi^-$ ,  $\alpha_{эф}$ ,  $\alpha_r$ ,  $\phi^+$ ,  $A$ , определяющих поведение D-области ионосферы с повышенным уровнем ионизации показал, что значения этих параметров не противоречат общепринятым представлениям об их поведении в условиях СПС.

Модельные расчеты  $N_{ем}(q_3)$  и  $q_M(N_{е3})$  показали, что все они достаточно хорошо укладываются в диапазон точности экспериментальных измерений скорости ионизации и электронной концентрации. Исключения составляют два случая. Первый — это поведение на высоте 85 км  $q_M > q_3$ , а  $N_{ем} < N_{е3}$ . Данный случай требует дополнительных исследований с привлечением, по-видимому, новых фотохимических механизмов взаимодействия солнечных протонов с ионосферой в верхней части D-области.

Второй случай определяется тем, что спад  $N_{е3}(q_3)$ , обнаруженный в диапазоне значений  $q_3 \approx (1.8 \div 2.0) \cdot 10^2 \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ , не может быть объяснен в рамках модели. Такой спад был обнаружен при запусках № 2 и 3, осуществленных в переходное время суток (от ночи ко дню). Запуск № 6 был также осуществлен в переходное время, но от дня к ночи, и спада  $N_{е3}$ , описанного выше, обнаружено не было.

Такая ситуация делает весьма актуальной разработку модели D-области в указанное время суток и не только в возмущенных условиях, рассматриваемых здесь, но и для спокойной ионосферы.

Показано, что повышенный уровень ионизации среды из трех малых составляющих, входящих в модель ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_3$ ), может влиять только на содержание озона — его концентрация падает от 5 до 25 % от нормального уровня в зависимости от высоты. Однако это падение не сказалось на результатах расчетов  $\Delta N_e$  и  $\Delta q$  по уравнениям (8).

В целом результаты, полученные в статье, еще раз подтвердили возможность широкого использования полуэмпирического метода, предложенного в [Козлов и др., 2022].

В дальнейшем целесообразно было бы применить этот метод и для других ситуаций, когда измеряется только электронная концентрация  $N_e$ , с целью получения значений скорости ионизации с последующим сравнением их с другими теоретическими оценками.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Боярчук А.К., Карелин А.В., Широков Р.В. *Базовая модель кинетики ионизированной атмосферы*. М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ». 2006, 203 с.  
 Журавлева Л.А., Кудрявцев В.П. *Нестационарная фотохимическая модель малых составляющих средней атмосферы. Сборник «Динамические процессы в геосферах»*. М.: ИДГ РАН. 1994, с. 191–204.  
 Зуев В.Е., Комаров В.С. *Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы*. Л.: Гидрометеоздат, 1986, 254 с.  
 Козлов С.И. *Аэронавтика искусственно возмущенных атмосферы и ионосферы Земли*. М.: ТОРУС-ПРЕСС, 2021, 268 с.  
 Козлов С.И., Ляхов А.Н. *Расчеты фотоотлипания электронов от  $\text{O}^-$  и  $\text{O}_2^-$  в области D ионосферы в зависимости*

- от высоты, зенитного угла и активности Солнца. *Солнечно-земная физика*. 2023, т. 9, № 4, с. 104–107. DOI: [10.12737/szf-94202312](https://doi.org/10.12737/szf-94202312) / Kozlov S.I., Lyakhov A.N. Photodetachment rates for O<sup>-</sup> and O<sub>2</sub><sup>-</sup> in the D layer of the ionosphere as function of solar zenith angle and solar activity. *Sol.-Terr. Phys.* 2023, vol. 9, iss. 4, pp. 95–98. DOI: [10.12737/stp-94202312](https://doi.org/10.12737/stp-94202312).
- Козлов С.И., Николаишвили С.Ш. Полуэмпирический приближенный метод исследования некоторых вопросов аэрoномии области D ионосферы. II. Отработка (калибровка) метода по экспериментальным данным. *Солнечно-земная физика*. 2024, т. 10, № 4, с. 79–90. DOI: [10.12737/szf-104202409](https://doi.org/10.12737/szf-104202409) / Kozlov S.I., Nikolaishvili S.Sh. Semi-empirical method of studying the D-layer aeronomy. II. Evidence-based calibration of the method. *Sol.-Terr. Phys.* 2024, vol. 10, iss. 4, pp. 72–83. DOI: [10.12737/stp-104202409](https://doi.org/10.12737/stp-104202409).
- Козлов С.И., Беккер С.З., Ляхов А.Н., Николаишвили С.Ш. Полуэмпирический приближенный метод исследования некоторых вопросов аэрoномии области D ионосферы. I. Основные принципы разработки метода и базовые уравнения. *Геомагнетизм и аэрoномия*. 2022, т. 62, № 5, с. 653–660. DOI: [10.31857/S0016794022050078](https://doi.org/10.31857/S0016794022050078).
- Мак-Ивен М., Филлипс Л. *Химия атмосферы*. М.: Мир, 1978, 376 с.
- Месси Г. *Отрицательные ионы*. М.: Мир, 1979, 754 с.
- Митра А.П. *Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли*. М.: Мир, 1977, 370 с.
- Пановский Г.А., Брайер Г.В., *Статистические методы в метеорологии*. Л.: Гидрометеoиздат, 1972, 244 с.
- Перов С.П., Хргиан А.Х. *Современные проблемы атмосферного озона*. Л.: Гидрометеoиздат, 1980, 154 с.
- Смирнов Б.М. *Отрицательные ионы*. М.: Атомиздат, 1978, 176 с.
- Смирнов Б.М. *Комплексные ионы*. М.: Наука, 1983, 149 с.
- Смирнова Н.В., Козлов С.И., Власков В.А. Овчинников Н.А. Ионная кинетика, малые нейтральные и возбужденные составляющие в области D с повышенным уровнем ионизации. III. Вариации малых нейтральных и возбужденных составляющих. *Космические исследования*. 1984, т. 22, № 4, с. 565–571.
- Gordillo Vazquez F.J. Air plasma kinetics under the influence of sprites. *J. Physics D: Applied Phys.* 2008, vol. 41, p. 234016. DOI: [10.1088/0022-3727/41/23/234016](https://doi.org/10.1088/0022-3727/41/23/234016).
- Read G.C. Influence of ionization on the neutral and ionized atmosphere. *Dynamical and Chemical Coupling Between the Neutral and Ionized Atmosphere*. Boston: D. Reidel Pub Co. 1977, p.101. DOI: [10.1007/978-94-010-1262-1](https://doi.org/10.1007/978-94-010-1262-1).
- Saidia L., Belasri A., Baadj S., Harrache Z. Physico-chemical investigation of pulsed discharge in CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> gas mixture. *Plasma Phys. Repts.* 2019, vol. 45, no. 5, pp. 501–516. DOI: [10.1134/S1063780X1905009X](https://doi.org/10.1134/S1063780X1905009X).
- Shimazaki T., Laird A.L. Seasonal effects on distributions of minor neutral constituents in the mesosphere and lower thermosphere. *Radio Sci.* 1972, vol. 7, no. 1, pp. 23–43. DOI: [10.1029/RS007i001p00023](https://doi.org/10.1029/RS007i001p00023).
- Swider W. Aeronomic aspects of the polar D-region. *Space Sci. Rev.* 1977, vol. 20, pp. 69–114. DOI: [10.1007/BF02186894](https://doi.org/10.1007/BF02186894).
- Swider W., Keneshea T.J., Foley C.I. An SPE-disturbed D-region model. *Planetary and Space Science*. 1978, vol. 26, pp. 883–892. DOI: [10.1016/0032-0633\(78\)90111-3](https://doi.org/10.1016/0032-0633(78)90111-3).
- Ulwick J.C. (Ed.): *Proc. COSPAR Symp. SPE Nov. 1969*, AFCRL-72-0474. 1972, 703 p.
- Van Gaens W., Bogaerts A. Kinetic modelling for an atmospheric pressure argon plasma jet in humid air. *J. Physics D: Applied Phys.* 2013, vol. 46, p. 275201. DOI: [10.1088/0022-3727/47/7/079502](https://doi.org/10.1088/0022-3727/47/7/079502).
- Whitten R.C., Poppoff I.G., Edmonds R.S., Berning W.W. Effective recombination coefficients in the lower ionosphere. *J. Geophys. Res.* 1965, vol. 70, iss. 7, p.1737–1742. DOI: [10.1029/JZ070i007p01737](https://doi.org/10.1029/JZ070i007p01737).
- Как цитировать эту статью:*  
Козлов С.И., Ляхов А.Н., Николаишвили С.Ш., Яким В.В. Полуэмпирический приближенный метод исследования некоторых вопросов аэрoномии области D ионосферы. III. Детальный анализ фотохимии среды в условиях повышенного уровня ионизации. *Солнечно-земная физика*. 2026, т. 12, № 1, с. 107–114. <https://doi.org/10.12737/szf-121202611>.