

**РАСЧЕТЫ ФОТООТЛИПАНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ОТ  $O^-$  И  $O_2^-$   
В ОБЛАСТИ D ИОНОСФЕРЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЫСОТЫ,  
ЗЕНИТНОГО УГЛА И АКТИВНОСТИ СОЛНЦА**

**PHOTODETACHMENT RATES FOR  $O^-$  AND  $O_2^-$  IN THE D LAYER  
OF THE IONOSPHERE AS FUNCTION  
OF SOLAR ZENITH ANGLE AND SOLAR ACTIVITY**

**С.И. Козлов***Институт динамики геосфер им. М.А. Садовского РАН,  
Москва, Россия, s\_kozlov@inbox.ru***А.Н. Ляхов***Институт динамики геосфер им. М.А. Садовского РАН,  
Москва, Россия, alyakhov@idg.chph.ras.ru  
Всероссийский НИИ автоматики им. Н.Л. Духова,  
Москва, Россия***S.I. Kozlov***Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics RAS,  
Moscow, Russia, s\_kozlov@inbox.ru***A.N. Laykhov***Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics RAS,  
Moscow, Russia, alyakhov@idg.chph.ras.ru  
Dukhov Automatics Research Institute,  
Moscow, Russia*

**Аннотация.** Представлены результаты расчетов коэффициентов фотоотлипания электронов от ионов  $O^-$  и  $O_2^-$  в области D ионосферы, основанные на последних измерениях сечений фотоотлипания. Расчеты выполнены для стандартной атмосферы с помощью программного кода TUV (Terrestrial UltraViolet). Получены зависимости коэффициентов фотоотлипания от высоты и зенитного угла Солнца. Нелинейный характер этих зависимостей приведет к аналогичному изменению роли процессов фотоотлипания в зависимости от высоты и солнечного зенитного угла в сравнении с другими процессами в средней атмосфере и нижней ионосфере, в особенности в сумеречных условиях. Вычисления с использованием экспериментальных спектров солнечного излучения за 2011–2020 гг., проведенные для дней зимнего и летнего солнцестояний и весеннего и осеннего равноденствий, не показали количественно значимого различия коэффициентов фотоотлипания от отрицательных ионов  $O^-$  и  $O_2^-$  в области D ионосферы.

**Ключевые слова:** ионосфера, D-слой, фотоотлипание.

**Abstract.** We present the results of calculation of photodetachment rates for negative ions in the D layer of the ionosphere, using recent photodetachment cross-section measurements. The calculations have been made for the standard atmosphere by means of the TUV (Terrestrial UltraViolet) code. We have obtained dependences of the photodetachment rates on altitude and solar zenith angle. The nonlinear nature of these dependences causes similar variations in the role of the photodetachment processes with altitude and solar zenith angle as compared to other processes in the middle atmosphere and the lower ionosphere, especially under terminator conditions. Calculations with solar spectrum for 2011–2020 for the summer/winter solstice and the spring/autumn equinox have shown no quantitative difference between the photodetachment rates for ions in the D layer of the ionosphere.

**Keywords:** ionosphere, D layer, photodetachment.

## ВВЕДЕНИЕ

В научном геофизическом сообществе считается, что D-область ионосферы, несмотря на многолетние и многочисленные ее исследования, изучена недостаточно. Такая ситуация определяется целым рядом причин. Они подробно анализируются и обсуждаются, например, в [Данилов, Власов, 1973; Митра, 1977; Уитген, Поппов, 1977; Мак-Ивен, Филлипс, 1978; Брасье, Соломон, 1987], а также в более поздних публикациях [Козлов, 2021; Козлов и др., 2022; Bekker et al., 2022].

Одной из важнейших причин являются наши ограниченные знания о константах скоростей многих фотохимических реакций, включая скорость фотоотлипания  $\rho(x^-)$  электронов от отрицательных

ионов. В зарубежной и отечественной литературе из одной статьи (книги) в другую используются одни и те же величины  $\rho(x^-)$  [с<sup>-1</sup>] [Митра, 1977]:

$$\rho(O_2^-) \approx 0.33, \rho(O^-) \approx 1.4, \rho(O_3^-) \approx 0.04,$$

$$\rho(NO_2^-) \approx 10^{-2\pm 1}, \rho(CO_3^-) \approx 1.5 \cdot 10^{-3}.$$

Практически не рассматривается вопрос: каким образом получены эти значения (теоретическим путем или в лабораторных экспериментах). Нет ссылок на известные работы, например, [Хастед, 1965; Месси, 1979; Смирнов, 1978, 1983], в которых фотоотлипание от отрицательных ионов анализируется как физический процесс, правда, по несколько устаревшим данным. Как правило, не даются зависимости  $\rho(x^-)$

от зенитного угла Солнца, высоты  $H$ , солнечной активности. Необходимость знания этих зависимостей очевидна. Такая ситуация приводит к неточностям при моделировании D-области, поскольку отрицательные ионы на  $H < 90$  км играют весьма заметную роль.

В настоящей статье делается попытка устранить отмеченные недостатки для первичных ионов  $O^-$  и  $O_2^-$ . К сожалению, выполнить аналогичные расчеты для сложных (кластерных) отрицательных ионов  $CO_3^-$ ,  $NO_2^-$ ,  $O_3^-$  и других в данный момент не представляется возможным из-за отсутствия необходимых сведений о таких ионах — прежде всего, достоверных сечений фотоотлипания.

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Стандартное уравнение для расчета  $\rho(x^-)$  имеет вид

$$\rho(X^-) = \int_{\lambda_n}^{\lambda} \varepsilon(\lambda, H) \sigma(\lambda) d\lambda,$$

где  $\lambda_n$  — пороговая длина волны солнечного излучения, на которой начинается фотоотлипание от  $O_2^-$  и  $O^-$ ;  $\sigma(\lambda)$  — сечение фотоотлипания;  $\varepsilon(\lambda, H)$  — поток излучения на соответствующей высоте  $H$  на длине волны  $\lambda$ . Значение  $\lambda_n(O^-)$  известно с хорошей точностью и равно 855 нм (1.45 эВ). Для иона  $O_2^-$  существует некоторый разброс, однако, согласно [Хастед, 1965], можно принять  $\lambda(O_2^-) \approx 2480$  нм (0.5 эВ).

На рис. 1 показаны используемые значения  $\sigma(\lambda)$  [Janalizadeh, Pasco, 2020]. Для оценки  $\varepsilon(\lambda, H)$  требуется задать спектр излучения Солнца для диапазона  $\lambda \leq 800$  нм и модель атмосферы, через которую это излучение распространяется.

Мы используем два спектра, показанные на рис. 2. Первый из них был взят из бюллетеня Всемирной метеорологической организации [Atmospheric Ozone, 1985]. Он является климатическим (средним). Вторым был получен в [NOAA, 2020] с учетом уровня солнечной активности в 11-летнем цикле (конкретная кривая на рис. 2 относится к 2018 г.). Расчет переноса излучения выполняется для стандартной атмосферы псевдосферическим четырехпоточковым методом дискретных ординат [Stamnes et al., 1988]. Альбедо поверхности принималось равным 0.1, содержание аэрозоля соответствовало среднему континентальному значению 0.25 [Elterman, 1968].

Конечные величины  $\varepsilon(\lambda, H)$  вычислялись по программе TUV (v. 5.3.2) [Madronich, 1993; Madronich, Flocke, 1998] для высот  $H = 60-90$  км с шагом 5 км при вариациях солнечного зенитного угла  $\chi$  в диапазоне 60–100°. Такой схема расчета позволяет получить максимально унифицированные результаты, пригодные для моделирования в любой точке координат, в любые сезон и время.

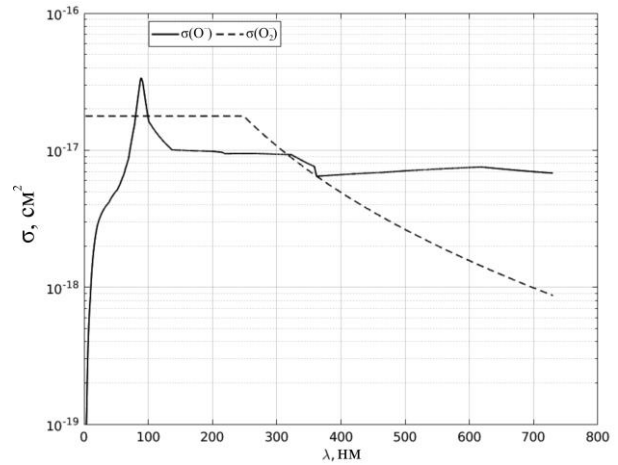


Рис. 1. Сечения фотоотлипания от ионов  $O_2^-$  и  $O^-$  по данным работы [Janalizadeh, Pasco, 2020]

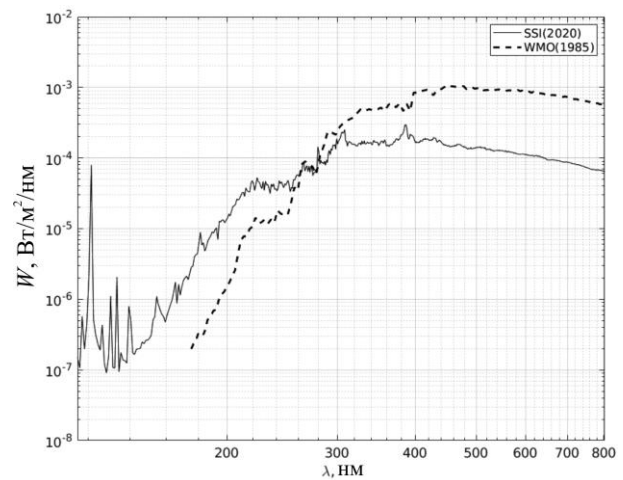


Рис. 2. Спектры излучения Солнца, используемые в расчетах

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчетов  $\rho(O^-)$  и  $\rho(O_2^-)$  в зависимости от  $H$ ,  $\chi$  для современного спектра [NOAA, 2020] представлены в табл. 1 и 2. На рис. 3 и 4 соответственно представлены зависимости скорости отлипания электронов от иона  $O^-$  для спектра [Atmospheric Ozone, 1985] от солнечного зенитного угла для двух значений высоты, ограничивающих D-область ионосферы, и от высоты (см. рис. 4) для трех значений солнечного зенитного угла. Зависимости для  $\rho(O_2^-)$  и для спектра [Atmospheric Ozone, 1985] выглядят аналогично, отличаясь только по абсолютным значениям. Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. При  $\chi \leq 80$  можно считать, что скорости фотоотлипания для обоих ионов постоянны на всех  $H$  при любой активности Солнца (рис. 3). Рассчитанные здесь для спектра [Atmospheric Ozone, 1985] значения  $\rho(O^-) = 1.29 \text{ c}^{-1}$ ,  $\rho(O_2^-) = 0.477 \text{ c}^{-1}$  весьма близки к обычно используемым величинам (см. введение). Однако для современного спектра [NOAA, 2020],

Таблица 1

Скорость фотоотлипания от  $O^-$  [ $c^{-1}$ ]

$\chi$ , градусы	60 км	65 км	70 км	75 км	80 км	85 км	90 км
<80	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4
88.5	7.38	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4
89.5	7.38	7.39	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4
90.5	7.36	7.39	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4
91.5	7.34	7.37	7.39	7.4	7.4	7.4	7.4
92.5	7.3	7.34	7.37	7.39	7.4	7.4	7.4
93.5	7.2	7.29	7.33	7.37	7.39	7.4	7.4
94.5	6.78	7.11	7.24	7.31	7.35	7.38	7.4
95.5	5.11	6.15	6.80	7.11	7.24	7.31	7.35
96.5	1.24	2.89	4.62	5.82	6.60	7.03	7.21
97.5	0.06	0.22	0.60	1.64	3.29	4.91	6.06
98.5	0.00	0.00	0.00	0.03	0.20	0.52	1.34
99.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Таблица 2

Скорость фотоотлипания от  $O_2^-$  [ $c^{-1}$ ]

$\chi$ , градусы	60 км	65 км	70 км	75 км	80 км	85 км	90 км
<80	2.44	2.44	2.44	2.44	2.44	2.44	2.44
88.5	2.41	2.43	2.44	2.44	2.44	2.44	2.44
89.5	2.41	2.43	2.44	2.44	2.44	2.44	2.44
90.5	2.39	2.42	2.43	2.44	2.44	2.44	2.44
91.5	2.37	2.40	2.43	2.43	2.44	2.44	2.44
92.5	2.34	2.37	2.40	2.43	2.44	2.44	2.44
93.5	2.28	2.33	2.36	2.40	2.42	2.43	2.44
94.5	2.12	2.24	2.30	2.34	2.38	2.41	2.43
95.5	1.55	1.91	2.13	2.24	2.30	2.34	2.38
96.5	0.28	0.80	1.38	1.80	2.06	2.21	2.28
97.5	0.009	0.036	0.12	0.40	0.94	1.48	1.88
98.5	0.00	0.00	0.00	0.005	0.03	0.095	0.31
99.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

на наш взгляд более реального,  $\rho(O^-) = 7.41 c^{-1}$ ,  $\rho(O_2^-) = 2.44 c^{-1}$ , что значительно больше ранее принимаемых значений.

2. Величины угла  $\chi$ , при которых следует учитывать уменьшение  $\rho(X^-)$ , определяются только высотой  $H$ . Эффект начинается с  $H=60$  км, постепенно переходя на большие высоты с увеличением  $\chi$ .

3. Дополнительные расчеты с целью проверить зависимости  $\rho(X^-)$  от солнечной активности в 11-летнем цикле, а также от сезона, выполненные на основе базы данных о спектрах [NOAA, 2020] за 2010–

2020 гг., показали, что межгодовая и сезонная изменчивость  $\rho(O^-)$  и  $\rho(O_2^-)$  в освещенных условиях не превышает 1 %.

4. При общих исследованиях спокойной и возмущенной D-области для восходно-заходных условий учет зависимости  $\rho(O^-)$  и  $\rho(O_2^-)$  от  $\chi$  становится необходимым.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ионы  $O_2^-$  и  $O^-$  являются первичными в сложной цепочке их преобразования в кластерные отрицатель-

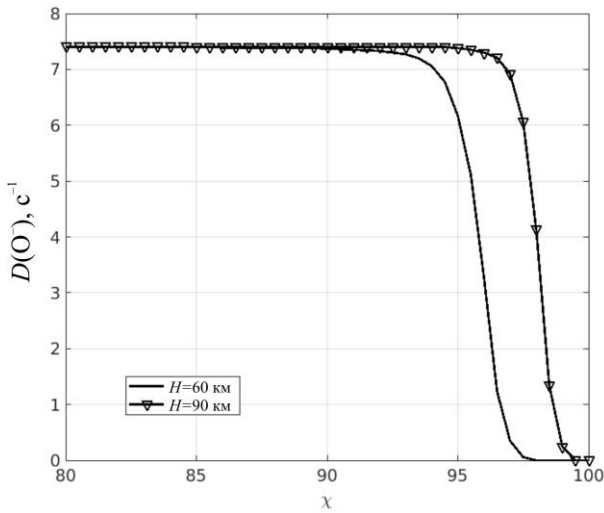


Рис. 3. Зависимость скорости фотоотлипания от иона  $O^-$  от солнечного зенитного угла на высотах 60 и 80 км для спектра [NOAA, 2020]

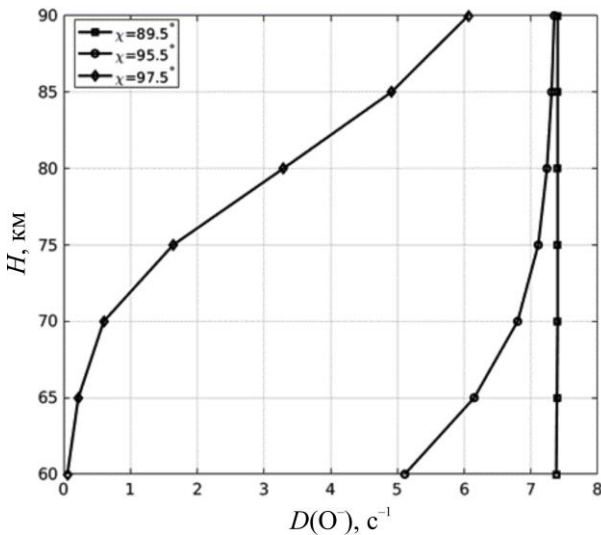


Рис. 4. Зависимость скорости фотоотлипания от иона  $O^-$  от высоты на зенитных углах  $89.5^\circ$ ,  $95.5^\circ$  и  $97.5^\circ$  для спектра [NOAA, 2020]

ные ионы. Использование рассчитанных в данной работе коэффициентов  $\rho(O^-)$ ,  $\rho(O_2^-)$  для более современных спектров излучения Солнца [NOAA, 2020] при моделировании D-области ионосферы приведет к уменьшению концентраций отрицательных ионов и увеличению скорости изменения электронной плотности  $n_e$ , что в первую очередь повлияет на распространение длинных и сверхдлинных радиоволн. Это следует учитывать при интерпретации данных радиомониторинга. Таким образом, учет новых значений коэффициентов фотоотлипания электронов от  $O_2^-$  и  $O^-$  повысит точность моделей D-области.

Работа поддержана Минобрнауки России (FNWM-2022-0021).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Брасье Г., Соломон С. *Аэрономия средней атмосферы*. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 412 с.
- Данилов А.Д., Власов М.Н. *Фотохимия ионизованных и возбужденных частиц в нижней ионосфере*. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 190 с.
- Козлов С.И. *Аэрономия искусственно возмущенных атмосферы и ионосферы Земли*. М.: Торус Пресс, 2021. 298 с.
- Козлов С.И., Беккер С.З., Ляхов А.Н., Николайшвили С.Ш. Полуэмпирический приближенный метод исследования некоторых вопросов аэрономии области D ионосферы. I. Основные принципы разработки метода и базовые уравнения. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2022. Т. 62, № 5. С. 653–660.
- Мак-Ивен М., Филлипс Л. *Химия атмосферы*. М.: Мир, 1978. 375 с.
- Месси Г. *Отрицательные ионы*. М.: Мир, 1979. 754 с.
- Митра А.П. *Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли*. М.: Мир, 1977. 370 с.
- Смирнов Б.М. *Отрицательные ионы*. М.: Атомиздат, 1978. 176 с.
- Смирнов Б.М. *Комплексные ионы*. М.: Наука, 1983. 149 с.
- Уиттен Р., Поппов И. *Основы аэрономии*. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 406 с.
- Хастед Дж. *Физика атомных столкновений*. М.: Мир, 1965. 710 с.
- Atmospheric Ozone*. World Meteorological Organization. *Global Ozone Research and Monitoring Project Report No. 16*. 1985. 392 p.
- Bekker S.Z., Kozlov S.I., Kudryavcev V.P. Comparison and verification of the different schemes for the ionization-recombination cycle of the ionospheric D-region. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2022. Vol. 127, iss.10, e2022JA030579. DOI: [10.1029/2022JA030579](https://doi.org/10.1029/2022JA030579).
- Elterman L. *UV Visible, and IR attenuation for altitudes to 50 km, 1968*. Air Force Cambridge Research Laboratories, Office of Aerospace Research, United States Air Force, 1968. 49 p.
- Janalizadeh R., Pasko V.P. A framework for efficient calculation of photoionization and photodetachment rates with application to the lower ionosphere. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2020. Vol. 125, iss. 7, e2020JA027979. DOI: [10.1029/2020JA027979](https://doi.org/10.1029/2020JA027979).
- Madronich S. UV radiation in the natural and perturbed atmosphere. *Environmental Effects of UV (Ultraviolet) Radiation*. Boca Raton, Lewis Publ., 1993. P. 17–69.
- Madronich S., Flocke S. The role of solar radiation in atmospheric chemistry. *Handbook of Environmental Chemistry*. Vol. 2, part L. Heidelberg, Springer-Verlag, 1998. P. 1–26.
- NOAA Climate Data Record (CDR) of Solar Spectral Irradiance (SSI), NRLSSI Version 2.1*. 2020. DOI: [10.7289/V53776SW](https://doi.org/10.7289/V53776SW).
- Stamnes K., Tsay S., Wiscombe W.J., Jayaweera K., Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media. *Appl. Optics*. 1988. Vol. 27, iss. 12. P. 2502–2509.
- Как цитировать эту статью:*  
Козлов С.И., Ляхов А.Н. Расчеты фотоотлипания электронов от  $O^-$  и  $O_2^-$  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).