

**ОЦЕНКА ВКЛАДА РАЗЛИЧНЫХ ФОТОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
В ПРОФИЛЬ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЕ**

**Е.Н. Козакова, С.З. Беккер**

Институт динамики геосфер им. академика М.А. Садовского РАН, Москва, Россия  
katyam98@yandex.ru

**ESTIMATING THE CONTRIBUTION OF VARIOUS PHOTOCHEMICAL PROCESSES  
TO THE ELECTRON CONCENTRATION PROFILE IN THE LOWER IONOSPHERE**

**E.N. Kozakova, S.Z. Bekker**

Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics RAS, Moscow, Russia  
katyam98@yandex.ru

**Аннотация.** Работа посвящена определению ключевых фотохимических процессов, оказывающих наибольшее влияние на динамику заряженных компонентов на различных высотах D-области ионосферы. Оценено относительное отклонение концентрации электронов при варьировании неточно заданных констант скоростей реакций, вносящих наибольший вклад в величину концентрации электронов. Для различных высот нижней ионосферы определены константы скоростей реакций, требующие принципиального уточнения для повышения точности расчета параметров среды.

**Ключевые слова:** D-область ионосферы, ионизационно-рекомбинационный цикл, концентрация электронов, константы скоростей реакций.

**Abstract.** The paper deals with determining the key photochemical processes that have the most significant impact on dynamics of charged components at various heights of the D region of the ionosphere. We estimated relative deviation of the electron density with varying inaccurate reaction rate constants that make the greatest contribution to the electron concentration value. For different heights of the lower ionosphere, we determined the reaction rate constants, which require refinement to increase the accuracy of calculating the medium parameters.

**Keywords:** D region of the ionosphere, ionization-recombination cycle, electron density, reaction rate constants.

**ВВЕДЕНИЕ**

Использование сложных схем ионизационно-рекомбинационного цикла требует знания большого количества входных параметров, причем значения некоторых известны с низкой точностью. Целью настоящей работы является определение фотохимических процессов в нижней ионосфере, оказывающих наибольшее влияние на динамику концентрации заряженных частиц в спокойных условиях и во время возмущений, и определение констант скоростей реакций, неточность задания которых приводит к наибольшим ошибкам при расчете концентрации электронов.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КЛЮЧЕВЫХ ПРОЦЕССОВ, ОКАЗЫВАЮЩИХ ВЛИЯНИЕ НА КОНЦЕНТРАЦИЮ ЭЛЕКТРОНОВ**

Была использована восьмикомпонентная схема ионизационно-рекомбинационного цикла, основанная на работе [Кудрявцев, Романюха, 1995]. По этой схеме была построена система дифференциальных уравнений, описывающая динамику концентрации электронов  $N_e$ , простых отрицательных ионов  $O_2^-$ , отрицательных кластерных ионов  $XY_1^-$ ,  $XY_2^-$  двух видов, простых положительных ионов  $O_2^+$  и  $NO^+$ , положительных кластерных ионов  $XY_1^+$ ,  $XY_2^+$  двух видов. Построенная система учитывает все основные процессы, протекающие в нижней ионосфере: ионизацию солнечным излучением и космическими лучами  $q$ , диссоциативную и ион-ионную рекомбинацию  $A$ , прилипание электронов в тройных соударениях  $\beta$ , фотоотлипание  $\gamma$ , отлипание в результате соударений  $P$ , реакции преобразования положительных и отрицательных ионов.

Скорость образования и исчезновения заряженных частиц определяется фотохимическими реакциями,

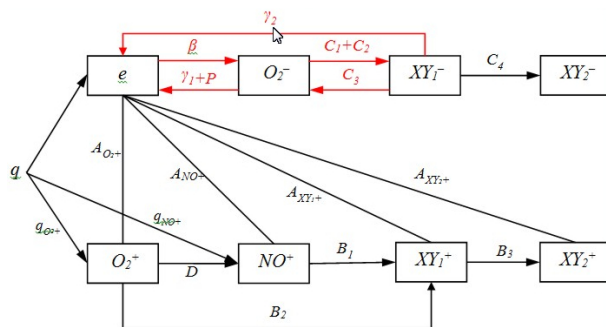


Рис. 1. Восьмикомпонентная схема ионизационно-рекомбинационного цикла D-области. Красным цветом показаны основные фотохимические процессы на высоте 60 км

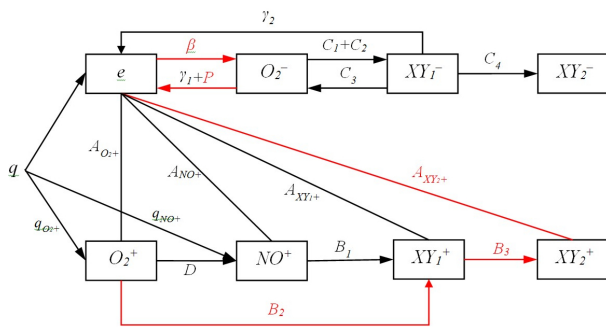


Рис. 2. То же для высоты 80 км

каждой из которых соответствует слагаемое в правой части дифференциального уравнения. В ходе работы были определены слагаемые, дающие наибольший вклад в значения концентрации ионов и электронов в диапазоне высот 50–90 км с шагом 5 км. Таким образом, было отобрано 14 констант скоростей реакций, играющих важное значение на рассматриваемых высотах. На рис. 1, 2 в качестве примера показана используемая схема ионизационно-рекомбина-

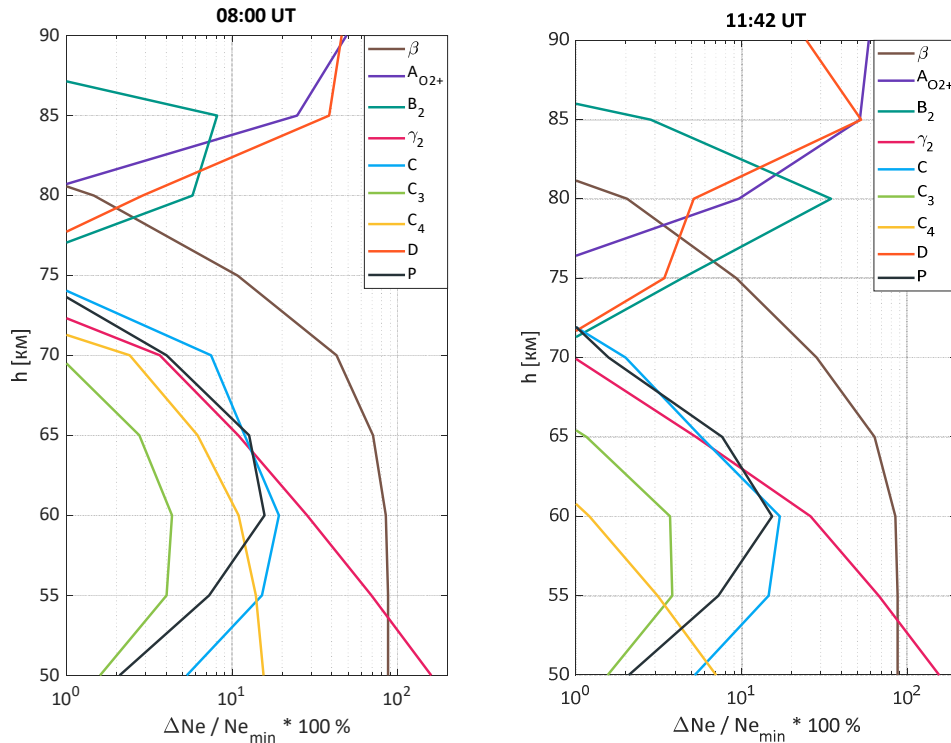


Рис. 3. Относительное изменение концентрации электронов при варьировании констант скоростей реакций

ционного цикла, на которой красным цветом обозначены реакции, имеющие ключевое значение на высотах 60 и 80 км соответственно.

### ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ КОНСТАНТ СКОРОСТЕЙ РЕАКЦИЙ

Для оценки разброса величин каждой отобранной константы скорости был проведен поиск их значений в пяти источниках информации [Кудрявцев, Романюха, 1995; Kossyi et al., 1992; Krivolutsky et al., 2015; Sentman et al., 2008; Verronen et al., 2016]. Оказалось, что значения некоторых констант отличаются в разных источниках на 1–2 порядка (например, константа скорости прилипания в тройных соударениях), что, естественно, приводит к существенным ошибкам в расчете параметров нижней ионосферы. В то же время значения ряда других констант оказались однозначно определенными. Был сделан вывод, что, несмотря на большой вклад в  $N_e$ , они не приведут к росту ошибок.

Для того чтобы определить, какие константы оказывают наибольшее влияние на точность расчета  $N_e$ , была проведена оценка относительного изменения  $N_e$  при последовательном варьировании параметров. Для каждой константы рассчитывался высотный профиль величины  $|N_{e,max} - N_{e,min}| / N_{e,min}$ , где  $N_{e,max}$  и  $N_{e,min}$  — полученные концентрации электронов при максимальном и минимальном значении константы.

Расчет был проведен для двух моментов времени, первый из которых соответствовал спокойным условиям (10.06.2014, 08:00 UT), второй — максимуму рентгеновской вспышки X-класса (10.06.2014,

11:42 UT). На рис. 3 показаны полученные высотные профили относительного изменения концентрации электронов при варьировании различных констант скоростей реакций. Оказалось, что неточность задания некоторых входных параметров приводит к изменению концентрации электронов более чем в два раза, что говорит о существенном влиянии выбора значений определенных констант.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для оптимизации задачи уточнения результатов модели, в первую очередь, необходимо определить ключевые механизмы и параметры, оказывающие наибольшее влияние на ее решения. В ходе данного исследования получен важный результат, который позволяет сузить набор корректируемых параметров построенного ионизационно-рекомбинационного цикла. В результате работы для различных высот D-области определен набор неточно заданных констант скоростей реакций, требующих принципиального уточнения для повышения точности расчета концентрации электронов в нижней ионосфере.

Работа выполнена в рамках Проекта РНФ № 21-77-00071.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кудрявцев В.П., Романюха Н.Ю. Моделирование ионизационно-рекомбинационных процессов в средней атмосфере. *Математическое моделирование*. 1995. Т. 7, № 3. С. 3–18.
- Kossyi I.A., Kostinsky A.Yu, Matveyev A.A., Silakov V.P. Kinetic scheme of the non-equilibrium discharge in nitrogen-oxygen mixtures. *Plasma Sources Sci. Technol.* 1. 1992. P. 207–220.

Krivolutsky A.A., Cherepanova L.A., V'yushkova T.Yu., Repnev A.I. The three-dimensional global numerical model CHARM-I: The incorporation of processes in the ionospheric D-region. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2015. Vol. 55, no. 4. P. 468–487.

Sentman D.D., Stenbaek-Nielsen H.C., McHarg M.G., Morril J.S. Plasma chemistry of sprite streamers. *J. Geophys. Res.* 2008. Vol. 113, D11112.

Verronen P.T., Andersson M.E, Marsh D.R., Kovacs T. Plane J.M.C. WACCM-D — Whole Atmosphere Community Climate Model with D-region ion chemistry. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 2016. Vol. 8. P. 954–975.