

ЭЛЕКТРОННО- И ИОННО-ОБРАЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫМ УДАРОМ НА ВЫСОТАХ D-, И E-СЛОЕВ ИОНОСФЕРЫ

А.С. Стрелков

В работе представлены результаты расчетов числа вторичных электронов, молекулярных, а также атомарных ионов азота и кислорода, создаваемых электронным ударом при воздействии на атмосферу электронов с энергиями 20 эВ–1 кэВ в диапазоне высот от 80 до 300 км. Приводятся сведения о спектрах вторичных электронов. Полученные значения числа вторичных электронов и ионов могут использоваться в расчетах ионизационной кинетики и радиофизических характеристик ионизируемых областей атмосферы.

Введение

Для расчетов ионизационного воздействия потоков электромагнитного излучения или корпускулярных потоков необходимо знать скорости образования заряженных частиц и их энергетические спектры. Последние используются для расчета частот столкновения частиц с частицами ионизируемой среды и между собой.

Наиболее часто встречаемый в геофизике средних широт случай ионизации за счет потоков ультрафиолетового, рентгеновского и гамма излучения, также как ионизации потоками выпадающих электронов в приполярных и полярных районах, в прямую или опосредованно сводится к расчету вторичного электронного и ионного образования за счет электронного удара по частицам атмосферы. Таковыми частицами в земной атмосфере в основном являются молекулы N_2 , O_2 , N и O с концентрациями зависящими от высоты. Для расчета выхода числа вторичных электронов – n_{sec} и молекулярных и атомарных ионов, а также спектра вторичных электронов была создана физико-математическая модель, реализованная в виде программы для персональных ЭВМ. Физические основы модели и программа подробно изложены в работе [Стрелков 2012].

Модернизация программы

Первые результаты расчета числа вторичных электронов при фотопоглощении квантов жесткого, сверх жесткого ультрафиолета и мягкого рентгена ($h\nu \leq 1000$ эВ) и при ударе электронов с энергией $E_{el}^0 \leq 1000$ эВ опубликованы в [Стрелков, 2012]. Результаты охватывают диапазон высот от 80 до 300 км, то есть применимы для расчетов ионизационных эффектов в D, E и частично F слоях ионосферы. Распределение компонент по высоте берется согласно модели атмосферы [MSISE 2000].

При проведении расчетов и последующем анализе результатов было выявлено, что основные трудности реализации программы и конечная точность результатов связаны главным образом с выбором процессов и сечений взаимодействия элек-

тронов с молекулярными компонентами и их представлению в программе. В связи с этим в физическую модель и программу были внесены уточнения в перечне процессов взаимодействия электронов с компонентами атмосферы, в значения сечений этих процессов и в их представление в программе.

В модели и программе при электронном ударе для молекул N_2 и O_2 учитываются процессы возбуждения колебательных и атомных уровней, диссоциации и ионизации. Такой набор процессов позволял отслеживать деградацию энергии вторичных электронов до энергий порядка 1 эВ. При взаимодействии с атомными компонентами учет потерь энергии на возбуждение тоже обеспечивал фиксацию потерь энергии вторичным электроном до уровня ~ 1 эВ.

С другой стороны в модели не учитываются два фактора: во-первых, потери энергии, определяемые транспортными сечениями, при упругом рассеянии электронов в столкновениях с молекулой или атомом, что характерно для электронов малых энергий. Эти потери энергии малы и значимы только при рассмотрении процесса термализации. Во-вторых, не учитывается процесс потери числа вторичных электронов за счет прилипания к молекулам. Согласно [Березин 2012] прилипание к N_2 очень мало. Основное прилипание идет к молекулам O_2 в процессе двухчастичного диссоциативного прилипания: $e + O_2 \rightarrow O + O^-$ и в процессе трехчастичного прилипания: $e + O_2 + M \rightarrow O_2^- + M$, где M – третья частица.

Для высот в атмосфере 80–300 км трехчастичное прилипание фактически не происходит из-за малой плотности частиц и малой вероятности этого процесса, характеризуемой коэффициентом реакции равным $\sim 10^{-30}$ см⁶/с.

Сечение диссоциативного прилипания имеет максимум при энергии электронов ~ 6 эВ и составляет $\sigma_{\text{attach}} \sim 9.5 \cdot 10^{-18}$ см². Вероятность этого процесса можно оценить, определяя его долю во всех процессах взаимодействия электрона с молекулой $\delta_{\text{attach}} = \sigma_{\text{attach}} / \sum \sigma$, где $\sum \sigma$ – сумма сечений всех процессов взаимодействия включая и прилипание. При энергии 6 эВ для высоты 80 км $\delta_{\text{attach}} < 9.5 \cdot 10^{-2}$, а для высоты 300 км $\delta_{\text{attach}} < 1.5 \cdot 10^{-14}$, что позволяет не вводить этот процесс в модель и программу.

Основное внимание при модификации программы было уделено отбору сечений для молекул N_2 и O_2 в интервале энергий до ~ 40 эВ. Анализ ряда обзорных работ, например [Юрова, 1989; Photo Ionization /Dissociation Rates] совместно с [Itikawa 2006; Itikawa 2007] позволил внести ряд поправок в значения сечений при малых энергиях. Роль этих поправок не велика. Основное изменение состоит в том, что в программу введены не сглаженные, как это было сделано в первом варианте программы, а полные таблицы сечений до 40 эВ со всеми их минимумами и максимумами. Такие поправки увеличили время счета, но повысили точность полученных результатов.

Кроме того, в новой версии программы осуществлен вывод результатов расчета числа ионов N_2^+ , O_2^+ , N^+ , O^+ и энергетических спектров вторичных электронов.

Полученные результаты

Полученные значения числа вторичных электронов приведены в таблице 1. В таблице 2 приведены значения энергетической цены образования вторичного электрона. Таблицы 3–6 содержат значения числа образуемых ионов. Следует отметить, что зарядовая эквивалентность суммы положительных зарядов с зарядом электронов в расчетах соблюдалась с точностью не хуже 0.1–1%.

Таблица 1

**Число вторичных электронов образуемых электронным ударом
в зависимости от энергии первичного электрона и высоты**

En0h	80	100	120	150	200	250	300
20	1.199E-01	1.197E-01	1.490E-01	1.954E-01	2.834E-01	4.058E-01	5.570E-01
30	3.847E-01	3.956E-01	4.321E-01	5.049E-01	6.387E-01	8.456E-01	1.120E+00
40	6.532E-01	6.766E-01	7.441E-01	9.001E-01	1.089E+00	1.347E+00	1.582E+00
50	8.854E-01	8.977E-01	9.826E-01	1.113E+00	1.315E+00	1.574E+00	1.822E+00
70	1.457E+00	1.463E+00	1.548E+00	1.727E+00	1.982E+00	2.327E+00	2.687E+00
100	2.521E+00	2.534E+00	2.655E+00	2.846E+00	3.150E+00	3.522E+00	3.894E+00
150	4.078E+00	4.052E+00	4.197E+00	4.484E+00	4.919E+00	5.515E+00	6.214E+00
200	5.628E+00	5.650E+00	5.776E+00	6.101E+00	6.613E+00	7.413E+00	8.251E+00
250	7.172E+00	7.175E+00	7.332E+00	7.695E+00	8.380E+00	9.345E+00	1.033E+01
300	8.729E+00	8.738E+00	8.939E+00	9.345E+00	1.011E+01	1.126E+01	1.247E+01
350	1.025E+01	1.030E+01	1.045E+01	1.100E+01	1.182E+01	1.312E+01	1.460E+01
400	1.180E+01	1.184E+01	1.197E+01	1.262E+01	1.355E+01	1.501E+01	1.665E+01
450	1.336E+01	1.335E+01	1.358E+01	1.419E+01	1.525E+01	1.690E+01	1.874E+01
500	1.489E+01	1.487E+01	1.514E+01	1.581E+01	1.697E+01	1.884E+01	2.087E+01
600	1.792E+01	1.796E+01	1.823E+01	1.897E+01	2.042E+01	2.264E+01	2.506E+01
700	2.099E+01	2.101E+01	2.132E+01	2.218E+01	2.383E+01	2.634E+01	2.938E+01
800	2.406E+01	2.404E+01	2.441E+01	2.539E+01	2.722E+01	3.017E+01	3.367E+01
900	2.705E+01	2.706E+01	2.740E+01	2.850E+01	3.068E+01	3.391E+01	3.783E+01
1000	3.013E+01	3.017E+01	3.056E+01	3.171E+01	3.391E+01	3.744E+01	4.153E+01

Таблица 2

Энергетическая цена образования вторичного электрона

En0h	80	100	120	150	200	250	300
20	1.668E+02	1.671E+02	1.342E+02	1.024E+02	7.057E+01	4.929E+01	3.591E+01
30	7.798E+01	7.583E+01	6.943E+01	5.942E+01	4.697E+01	3.548E+01	2.679E+01
40	6.124E+01	5.912E+01	5.376E+01	4.444E+01	3.671E+01	2.970E+01	2.529E+01
50	5.647E+01	5.570E+01	5.089E+01	4.493E+01	3.801E+01	3.176E+01	2.744E+01
70	4.806E+01	4.785E+01	4.522E+01	4.054E+01	3.532E+01	3.008E+01	2.605E+01
100	3.967E+01	3.946E+01	3.767E+01	3.513E+01	3.175E+01	2.839E+01	2.568E+01
150	3.679E+01	3.702E+01	3.574E+01	3.345E+01	3.049E+01	2.720E+01	2.414E+01
200	3.554E+01	3.540E+01	3.463E+01	3.278E+01	3.024E+01	2.698E+01	2.424E+01
250	3.486E+01	3.484E+01	3.410E+01	3.249E+01	2.983E+01	2.675E+01	2.421E+01

En0\h	80	100	120	150	200	250	300
300	3.437E+01	3.433E+01	3.356E+01	3.210E+01	2.967E+01	2.664E+01	2.406E+01
350	3.416E+01	3.399E+01	3.348E+01	3.183E+01	2.961E+01	2.669E+01	2.397E+01
400	3.390E+01	3.380E+01	3.341E+01	3.171E+01	2.952E+01	2.664E+01	2.403E+01
450	3.368E+01	3.372E+01	3.315E+01	3.170E+01	2.951E+01	2.662E+01	2.402E+01
500	3.358E+01	3.362E+01	3.302E+01	3.163E+01	2.947E+01	2.654E+01	2.395E+01
600	3.348E+01	3.340E+01	3.291E+01	3.163E+01	2.939E+01	2.650E+01	2.394E+01
700	3.335E+01	3.331E+01	3.283E+01	3.157E+01	2.938E+01	2.658E+01	2.383E+01
800	3.324E+01	3.327E+01	3.278E+01	3.151E+01	2.940E+01	2.652E+01	2.376E+01
900	3.327E+01	3.327E+01	3.285E+01	3.158E+01	2.934E+01	2.654E+01	2.379E+01
1000	3.317E+01	3.313E+01	3.271E+01	3.152E+01	2.947E+01	2.670E+01	2.407E+01

Таблица 3

**Число ионов молекулярного азота N_2^+ ,
образуемых электронным ударом
в зависимости от энергии первичного электрона и высоты**

En0\h	80	100	120	150	200	250	300
20	9.860E-02	9.670E-02	1.003E-01	1.300E-02	9.460E-02	7.610E-02	5.970E-02
30	7.640E-02	7.440E-02	7.290E-02	6.520E-02	5.600E-02	3.500E-02	2.240E-02
40	1.203E-01	1.183E-01	1.224E-01	1.224E-01	1.155E-01	1.018E-01	7.620E-02
50	1.677E-01	1.768E-01	1.735E-01	1.717E-01	1.357E-01	1.023E-01	6.260E-02
70	3.886E-01	3.903E-01	3.863E-01	3.507E-01	2.993E-01	2.309E-01	1.566E-01
100	6.090E-01	6.270E-01	6.214E-01	5.530E-01	4.604E-01	3.365E-01	2.101E-01
150	9.872E-01	9.914E-01	9.710E-01	8.828E-01	7.418E-01	5.328E-01	3.482E-01
200	1.350E+00	1.348E+00	1.314E+00	1.189E+00	1.022E+00	7.760E-01	4.984E-01
250	1.673E+00	1.690E+00	1.662E+00	1.522E+00	1.323E+00	9.812E-01	6.856E-01
300	2.009E+00	2.066E+00	2.011E+00	1.868E+00	1.593E+00	1.239E+00	8.268E-01
350	2.327E+00	2.410E+00	2.312E+00	2.192E+00	1.844E+00	1.432E+00	1.017E+00
400	2.668E+00	2.716E+00	2.670E+00	2.484E+00	2.170E+00	1.661E+00	1.169E+00
450	2.969E+00	3.050E+00	2.946E+00	2.785E+00	2.406E+00	1.887E+00	1.370E+00
500	3.292E+00	3.347E+00	3.284E+00	3.125E+00	2.718E+00	2.118E+00	1.531E+00
600	3.886E+00	3.991E+00	3.949E+00	3.728E+00	3.286E+00	2.614E+00	1.865E+00
700	4.543E+00	4.589E+00	4.524E+00	4.324E+00	3.876E+00	3.050E+00	2.167E+00
800	5.149E+00	5.235E+00	5.170E+00	4.955E+00	4.405E+00	3.520E+00	2.554E+00
900	5.798E+00	5.820E+00	5.829E+00	5.561E+00	4.944E+00	3.967E+00	2.871E+00
1000	6.322E+00	6.478E+00	6.514E+00	6.194E+00	5.547E+00	4.418E+00	3.159E+00

Таблица 4

**Число ионов атомарного азота N^+ , образуемых электронным ударом
в зависимости от энергии первичного электрона и высоты**

En0\h	80	100	120	150	200	250	300
20	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.000E-04	6.900E-03	1.820E-02	3.500E-02
30	2.445E-01	2.520E-01	2.513E-01	2.438E-01	2.335E-01	2.017E-01	1.722E-01
40	4.226E-01	4.215E-01	4.045E-01	3.721E-01	3.153E-01	2.520E-01	1.985E-01
50	5.579E-01	5.555E-01	5.452E-01	5.062E-01	4.577E-01	3.842E-01	3.212E-01
70	7.937E-01	8.075E-01	7.818E-01	7.347E-01	6.349E-01	5.043E-01	3.885E-01
100	1.423E+00	1.430E+00	1.400E+00	1.279E+00	1.087E+00	8.328E-01	5.944E-01
150	2.299E+00	2.285E+00	2.235E+00	2.018E+00	1.706E+00	1.292E+00	9.354E-01
200	3.196E+00	3.239E+00	3.116E+00	2.811E+00	2.309E+00	1.714E+00	1.214E+00
250	4.092E+00	4.120E+00	3.954E+00	3.562E+00	2.945E+00	2.176E+00	1.544E+00
300	4.982E+00	4.988E+00	4.831E+00	4.339E+00	3.613E+00	2.610E+00	1.872E+00
350	5.883E+00	5.912E+00	5.706E+00	5.126E+00	4.239E+00	3.085E+00	2.172E+00
400	6.758E+00	6.845E+00	6.549E+00	5.917E+00	4.797E+00	3.564E+00	2.431E+00
450	7.696E+00	7.698E+00	7.463E+00	6.696E+00	5.527E+00	4.008E+00	2.778E+00
500	8.598E+00	8.638E+00	8.337E+00	7.501E+00	6.143E+00	4.472E+00	3.086E+00
600	1.039E+01	1.045E+01	1.007E+01	8.970E+00	7.363E+00	5.340E+00	3.693E+00
700	1.220E+01	1.229E+01	1.186E+01	1.058E+01	8.561E+00	6.223E+00	4.346E+00
800	1.398E+01	1.411E+01	1.359E+01	1.206E+01	9.848E+00	7.146E+00	4.994E+00
900	1.576E+01	1.594E+01	1.529E+01	1.362E+01	1.111E+01	8.094E+00	5.578E+00
1000	1.764E+01	1.780E+01	1.706E+01	1.509E+01	1.222E+01	8.936E+00	6.139E+00

Таблица 5

**Число ионов молекулярного кислорода O_2^+ ,
образуемых электронным ударом
в зависимости от энергии первичного электрона и высоты**

En0\h	80	100	120	150	200	250	300
20	2.090E-02	1.390E-02	9.800E-03	6.900E-03	3.600E-03	2.700E-03	1.500E-03
30	5.610E-02	4.550E-02	2.960E-02	1.600E-02	7.600E-03	5.500E-03	2.400E-03
40	8.910E-02	7.560E-02	4.370E-02	2.730E-02	1.380E-02	6.100E-03	4.100E-03
50	1.223E-01	9.900E-02	6.680E-02	3.230E-02	1.650E-02	1.060E-02	7.200E-03
70	2.035E-01	1.518E-01	1.003E-01	5.050E-02	2.350E-02	1.680E-02	8.600E-03
100	3.390E-01	2.751E-01	1.737E-01	8.800E-02	4.840E-02	2.510E-02	1.390E-02
150	5.418E-01	4.378E-01	2.758E-01	1.378E-01	7.020E-02	3.680E-02	2.220E-02
200	7.258E-01	5.894E-01	3.644E-01	1.822E-01	9.780E-02	5.620E-02	2.960E-02

En0\h	80	100	120	150	200	250	300
250	9.262E-01	7.642E-01	4.684E-01	2.494E-01	1.126E-01	7.540E-02	4.140E-02
300	1.146E+00	9.246E-01	5.692E-01	2.954E-01	1.482E-01	8.400E-02	4.500E-02
350	1.350E+00	1.085E+00	6.822E-01	3.364E-01	1.620E-01	1.072E-01	5.100E-02
400	1.547E+00	1.267E+00	7.852E-01	3.976E-01	2.040E-01	1.196E-01	6.700E-02
450	1.785E+00	1.447E+00	9.010E-01	4.568E-01	2.202E-01	1.348E-01	6.940E-02
500	1.974E+00	1.599E+00	1.007E+00	4.998E-01	2.584E-01	1.482E-01	7.860E-02
600	2.424E+00	1.959E+00	1.212E+00	6.092E-01	3.104E-01	1.706E-01	9.580E-02
700	2.808E+00	2.301E+00	1.426E+00	7.210E-01	3.848E-01	2.102E-01	1.166E-01
800	3.272E+00	2.626E+00	1.654E+00	8.378E-01	4.274E-01	2.328E-01	1.272E-01
900	3.634E+00	2.941E+00	1.872E+00	9.434E-01	4.836E-01	2.762E-01	1.576E-01
1000	4.111E+00	3.278E+00	2.059E+00	1.059E+00	5.376E-01	3.166E-01	1.732E-01

Таблица 6

**Число ионов атомарного кислорода O^+ ,
образуемых электронным ударом
в зависимости от энергии первичного электрона и высоты**

En0\h	80	100	120	150	200	250	300
20	4.000E-04	9.100E-03	3.890E-02	9.530E-02	1.783E-01	3.088E-01	4.608E-01
30	7.700E-03	2.360E-02	7.830E-02	1.799E-01	3.416E-01	6.034E-01	9.228E-01
40	2.120E-02	6.120E-02	1.735E-01	3.756E-01	6.449E-01	9.869E-01	1.303E+00
50	3.740E-02	6.640E-02	1.971E-01	4.025E-01	7.055E-01	1.077E+00	1.431E+00
70	7.070E-02	1.132E-01	2.797E-01	5.907E-01	1.024E+00	1.575E+00	2.133E+00
100	1.490E-01	2.015E-01	4.597E-01	9.262E-01	1.554E+00	2.328E+00	3.076E+00
150	2.496E-01	3.382E-01	7.158E-01	1.445E+00	2.401E+00	3.654E+00	4.908E+00
200	3.562E-01	4.738E-01	9.812E-01	1.918E+00	3.184E+00	4.867E+00	6.509E+00
250	4.802E-01	6.012E-01	1.247E+00	2.362E+00	4.000E+00	6.112E+00	8.056E+00
300	5.924E-01	7.594E-01	1.527E+00	2.843E+00	4.756E+00	7.330E+00	9.726E+00
350	6.876E-01	8.908E-01	1.753E+00	3.342E+00	5.573E+00	8.491E+00	1.136E+01
400	8.270E-01	1.008E+00	1.968E+00	3.817E+00	6.379E+00	9.669E+00	1.298E+01
450	9.100E-01	1.151E+00	2.267E+00	4.255E+00	7.097E+00	1.087E+01	1.452E+01
500	1.027E+00	1.287E+00	2.514E+00	4.684E+00	7.846E+00	1.210E+01	1.618E+01
600	1.223E+00	1.564E+00	3.000E+00	5.663E+00	9.456E+00	1.451E+01	1.941E+01
700	1.434E+00	1.828E+00	3.513E+00	6.548E+00	1.100E+01	1.685E+01	2.275E+01
800	1.662E+00	2.069E+00	3.990E+00	7.533E+00	1.253E+01	1.927E+01	2.599E+01
900	1.855E+00	2.359E+00	4.407E+00	8.374E+00	1.414E+01	2.158E+01	2.923E+01
1000	2.062E+00	2.615E+00	4.925E+00	9.372E+00	1.560E+01	2.377E+01	3.206E+01

Поскольку при малых энергиях первичных электронов существует расхождение между ранее полученными и пересчитанными значениями n_{sec} , то были сделаны аналитические оценки возможного числа вторичных электронов. Оценки основаны на вычислении вероятности того, что электрон с энергией E_{el}^0 в первом столкновении произведет ионизацию, а не потеряет энергию в других конкурирующих процессах. При столкновении с молекулами конкурирующими являются процессы возбуждения и диссоциации, а для атомов – возбуждения и тормозные потери. Как показывает просмотр последовательных потерь энергии, такое приближение приемлемо для $E_{el}^0 \approx 20$ эВ, поскольку число столкновений для сброса энергии до уровня порядка 0.1 эВ не более 2.

При малых значениях E_{el}^0 в молекулярных столкновениях можно пренебречь ротационными и вибрационными потерями ввиду малых значений теряемой энергии, а в атомных столкновениях тормозными потерями по той же причине.

Используя такое приближение определения числа n_{sec} , и взяв сечения из [Itikawa 2006; Itikawa 2007], были получены при $E_{el}^0 = 20$ эВ значения: для N_2 $n_{sec} = 0.133$ и для O_2 $n_{sec} = 0.145$. Расчетные значения для N_2 $n_{sec} = 0.153$ и для O_2 $n_{sec} = 0.135$. Расхождения между расчетными и оценочными значениями составляет ~ -15 и $+7\%$. Для атмосферы с составом 78.1% N_2 и 21.9% O_2 (высоты $h \leq 80$ км) оценка дает $n_{sec} = 0.135$, а расчет $n_{sec} = 0.152$ (расхождение $\sim -12\%$).

Из всех сопоставлений оценочных и расчетных значений n_{sec} можно сделать вывод о том, что новые данные о числе вторичных электронов и ионов корректны. Точность определения n_{sec} при статистике в $5.0 \cdot 10^4$ рассчитываемых энергетических траекторий, целиком определяется точностью используемых сечений взаимодействия электронов с компонентами воздуха. Приводимые в литературе оценки точности измерения или расчета значений сечений имеют разброс от нескольких единиц до $\sim 30\%$. Исходя из этого, можно ожидать, что точность полученных значений числа вторичных электронов и ионов составляет $\sim 10\text{--}15\%$.

Обсуждение результатов

Результаты расчетов числа вторичных электронов и энергетической цены их образования приведены в таблицах 1 и 2. Числа ионов N_2^+ и N^+ даны в таблицах 3 и 4, а числа ионов O_2^+ и O^+ в таблицах 5 и 6.

Общие закономерности изменения числа вторичных электронов полностью совпадают с полученными ранее: увеличение числа вторичных электронов с увеличением E_{el}^0 ; выход на равновесное состояние значения энергии затрачиваемой на создание одного вторичного электрона для $E_{el}^0 \geq 300$ эВ; увеличение числа n_{sec} с увеличением высоты, которое вызвано снижением содержания в атмосфере O_2 и увеличением содержания O .

При малых энергиях $E_{el}^0 \leq 100$ эВ основным ионом на высотах 80–100 км является ион N_2^+ , а для больших энергий N^+ . На высотах ~ 300 км при всех значениях E_{el}^0 основным ионом становится ион O^+ . Такое изменение основного иона связано с тем, что с высотой резко возрастает концентрация атомарного кислорода и, кроме того, порог ионизации O (14.15 эВ) меньше порога ионизации N_2 (15.58 эВ).

Для ионных компонент, также как и для электронов, происходит выход на равновесные значения отношения E_{el}^0/n_{ion} при $E_{el}^0 \geq 300$ эВ. Это хорошо видно на рисунках 1 и 2. На этих рисунках приведены зависимости числа ионов от E_{el}^0 для ряда высот. На рисунках так же представлены аппроксимирующие функции $n_{ion}(E_{el}^0)$.

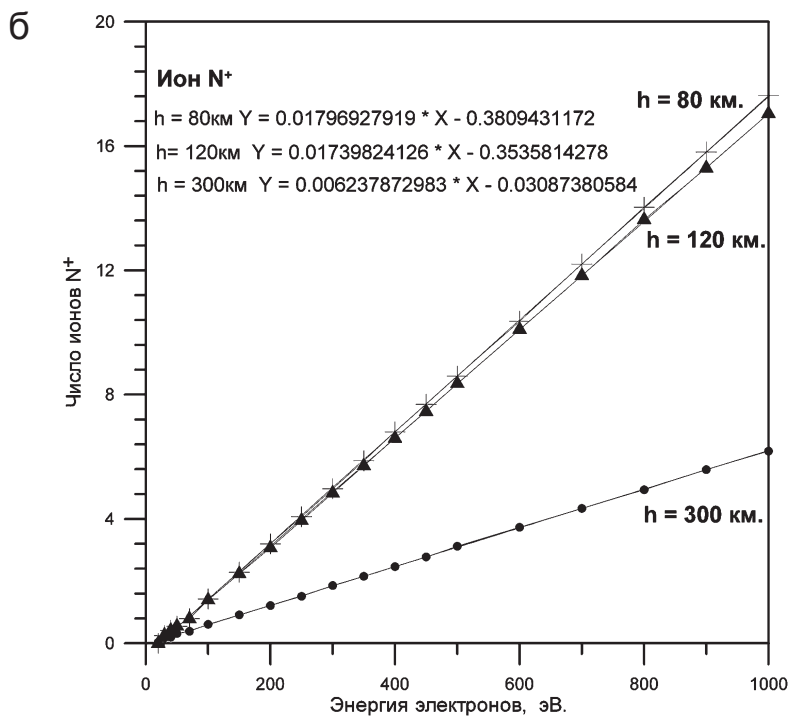
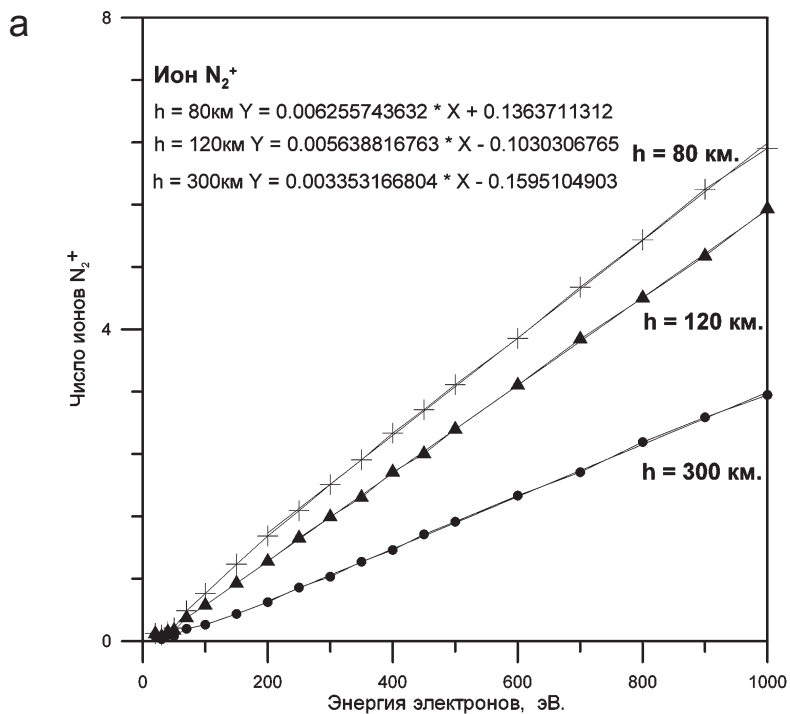


Рис. 1. Зависимость числа молекулярных (а) и атомарных (б) ионов азота от энергии первичного электрона и высоты

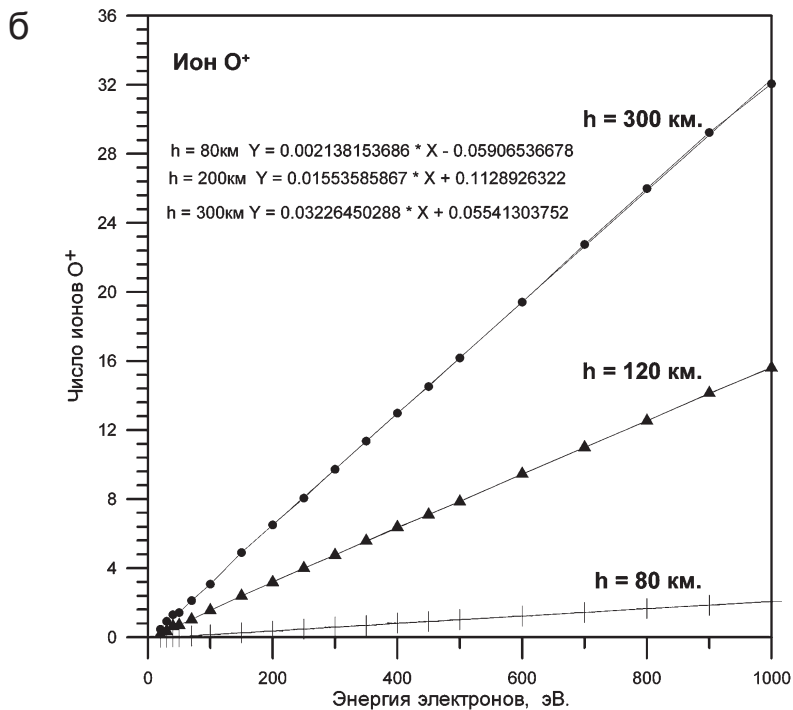
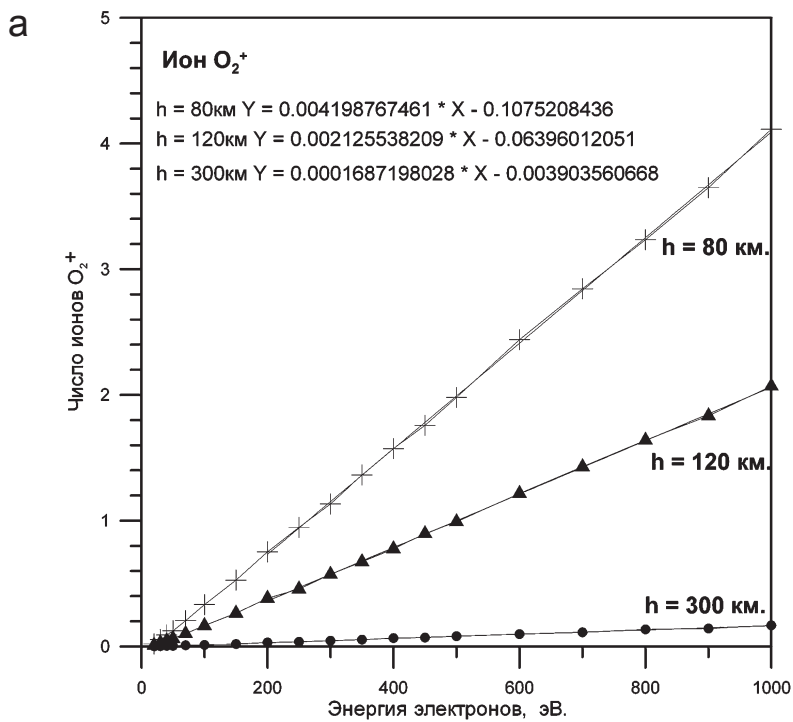


Рис. 2. Зависимость числа молекулярных (а) и атомарных (б) ионов кислорода от энергии первичного электрона и высоты

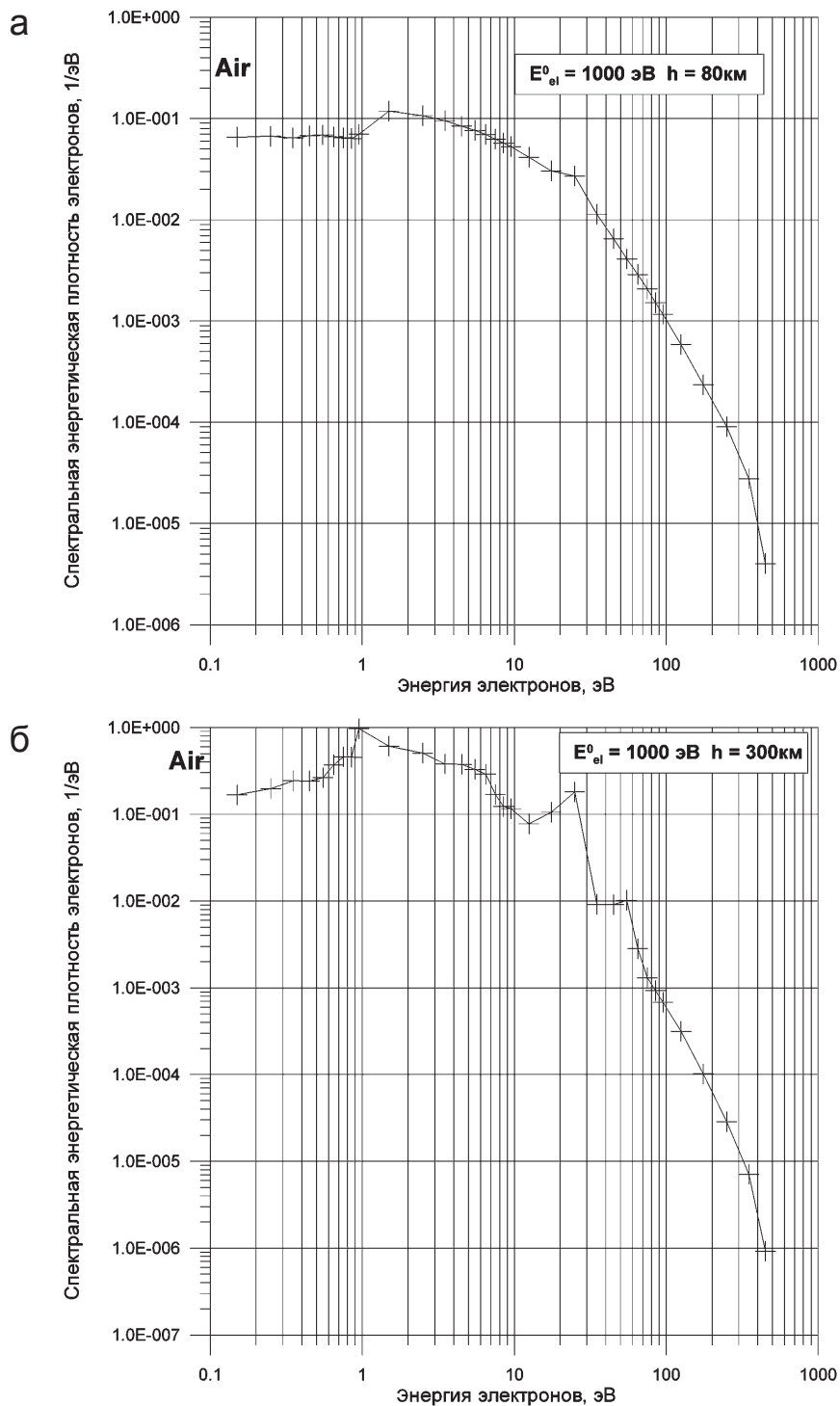


Рис. 3. Энергетические спектры вторичных электронов образованные при взаимодействии электрона с энергией 1000 эВ с воздушной средой на высотах (а) 80 и (б) 300 км

Энергетические спектры вторичных электронов – $SP_{sec}(E_{els}, E_{els}^0, h)$ используются главным образом при расчетах радифизических свойств ионизированной воздушной среды и процессов энергообмена. Примеры спектров для высот 80 и 300 км приведены на рис. 3. Сравнение вида спектров с приводимыми в литературе спектрами вторичных электронов для N_2 и O_2 [Opal et al., 1972; Коновалов, 1993] показали хорошее совпадение формы спектров.

Наибольшее число вторичных электронов в спектрах лежит в интервале энергий от 0.1 до ~10 эВ. Для $h = 80$ км максимум числа n_{sec} приходится на интервал 1–2 эВ и сдвигается на интервал 2–3 эВ с увеличением высоты до 300 км, что существенно превосходит энергию ионосферных электронов. Это обстоятельство может оказаться существенным при расчетах частот соударений электронов с нейтральными и заряженными частицами. Энергия электрона 1 эВ соответствует температуре $T \sim 1.16 \cdot 10^4$ К. Приближенные оценки зависимости частоты соударений электронов с молекулами вида $v_{em} \sim \sqrt{T/300}$ дают увеличение частоты соударений v_{em} в ~6 раз. Для соударений с ионами $v_{ei} \sim T^{-3/2}$ частота уменьшится в ~300 раз. Сделанные оценки подтверждают необходимость использования SP_{sec} в расчетах радиофизических характеристик ионизуемой среды, особенно при больших скоростях образования электронно-ионных пар.

Заключение

Разработана физико-математическая модель и программа расчета деградации энергии электрона в соударениях с компонентами воздушной среды. Для первичных электронов с энергиями от 20 до 1000 эВ и состава атмосферы на высотах от 80 до 300 км получены значения числа вторичных электронов и ионов. Для всех энергий и высот рассчитаны энергетические спектральные распределения вторичных электронов. Поскольку модель и программа учитывает процессы возбуждения и диссоциации N_2 и O_2 , то ее можно применить для расчета выхода в процессе электронных ударов таких продуктов, как $O_2(^1\Delta_g)$ и $N_2(A^3\Sigma_u^+)$, которые непосредственно используются в уравнениях кинетики электронных и ионных компонент в ионизированной атмосфере и нейтральных атомарных продуктов – О и N. На основании оценок можно сделать вывод, что при солнечных рентгеновских вспышках расчетные значения числа продуктов ионизации, полученные с использованием удельных концентраций основных компонентов, характерных для невозмущенной атмосферы, справедливы.

Предполагается, что полученные результаты будут использоваться для расчета скоростей ионообразования в D- и E-областях ионосферы с учетом всего спектра солнечного излучения в жестком ультрафиолетовом и рентгеновском диапазоне энергий, а также при вспышках солнечного гамма-излучения. При этом предполагается, что в рекомендуемое спектральное распределение удастся вводить поправки на основании спутниковых данных о потоках ультрафиолета в разных спектральных диапазонах и в рентгеновском диапазоне. Это позволит производить расчеты ионизации атмосферы для конкретной даты и времени и тем самым определять условия распространения радиоволн различных диапазонов.

Литература

Березин А.В. и др. Электронно-фотонный каскад в газе. Часть 2. Сечения столкновений. Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2012. № 7. 24 URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id.>

Коновалов В.П. Деградационный спектр электронов в азоте, кислороде и воздухе // ЖТФ том 63, N 3, 1993. С 23–33.

Стрелков А.С. Вторичное электронообразование в D- и E- слоях ионосферы в процессе ионизации жестким ультрафиолетовым и рентгеновским излучением солнца // Динамические процессы в геосферах: Сборник научных трудов ИДГ РАН. Выпуск 3. М.: 2012. ГЕОС. С. 130–140.

Юрова И.Ю., Иванов В.Е. Сечения рассеяния электронов атмосферными газами. Л. Наука 1989.

Photo Ionization /Dissociation Rates. <http://phidrates.space.swri.edu>

Itikawa Y. // J. Phys. Chem. Ref. Data. 2006. V35. No. 1. P. 31.

Itikawa Y. // J. Phys. Chem. Ref. Data. 2008. V38. No. 1. P.1.

MSISE 2000 http://uap-www.nrl.navy.mil/models_web/msis_home.htm

Opal C.B., E.C. Beaty and W.K. Peterson // Atomic Data. 1972. V4. P. 209.