

*Российская Академия Наук*

КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР

Полярный геофизический институт

В.Е.Иванов, Б.В.Козелов

---

**ПРОХОЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ  
И ПРОТОННО-ВОДОРОДНЫХ  
ПУЧКОВ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ**

---

Апатиты  
2001

48596

Печатается по постановлению  
Президиума Кольского научного центра Российской академии наук

УДК 550.388

В.Е.Иванов, Б.В.Козелов

**Прохождение электронных и протонно-водородных пучков в атмосфере Земли**  
– Апатиты: изд. Кольского научного центра РАН, 2001, -260 с.

Книга посвящена теоретическому исследованию процесса переноса авроральных частиц (электронов с начальными энергиями более 50 эВ, протонов и атомов водорода с начальными энергиями более 1 кэВ) в высокоширотной атмосфере Земли. Основные темы, затрагиваемые в книге, представляют собой следующие разделы: а) исследование современного состояния уровня знания сечений рассеяния интегральных и дифференциальных электронов, протонов и атомов водорода основными атмосферными газами (атомарный кислород, молекулярный кислород и молекулярный азот) в диапазоне энергий от порогов возбуждения до области асимптотического поведения сечений; б) детальное исследование фундаментальных характеристик переноса (функция распределения и ее эволюция по мере проникновения пучка в среду, длины пробегов и альбедо-потери, пространственное расплывание пучка и т.п.) авроральных частиц в трехкомпонентной модели нейтральной атмосферы Земли с учетом дипольного магнитного поля; в) исследование процесса распределения кинетической энергии авроральных частиц по уровням внутреннего возбуждения нейтральных компонент атмосферы (электронным и колебательным состояниям атомарного кислорода, молекулярного кислорода и молекулярного азота).

Книга адресована исследователям, занимающимся изучением околоземного космического пространства. Может быть полезна также аспирантам и студентам старших курсов соответствующих специальностей, обучающимся на физических и геофизических факультетах.

Ил. - 172, табл. - 49, библиогр. - 359 назв.

Рецензенты:

доктор физ.-мат. наук А.А.Намгаладзе,  
доктор физ.-мат. наук В.С.Мингалев

*Издание осуществлено при поддержке*

*Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 01-05-78018 г)*



РФФИ

© В.Е.Иванов, Б.В.Козелов, 2001  
© Полярный геофизический институт КНЦ РАН, 2001  
© Кольский научный центр РАН, 2001

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
ПРЕДИСЛОВИЕ.....	11
ГЛАВА 1. АВРОРАЛЬНЫЕ $e$ - $p$ -Н ЧАСТИЦЫ В ВЫСОКОШИРОТНОЙ АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ.....	13
1.1. Высокоширотная ионосфера и характеристики $e$ - $p$ -Н пучков .....	13
1.2. Модели переноса энергичных частиц в атмосфере Земли .....	18
1.2.1. Модели переноса авроральных электронов в атмосфере Земли.....	18
1.2.2. Модели переноса авроральных протонов в атмосфере Земли.....	19
1.3. Особенности моделирования переноса авроральных пучков в атмосфере Земли.....	20
ГЛАВА 2. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОНОВ С АТМОСФЕРНЫМИ ГАЗАМИ.....	25
2.1. Дифференциальные, интегральные и суммарные сечения рассеяния....	25
2.2. Сечения рассеяния электронов атомарным кислородом.....	26
2.2.1. Упругое рассеяние.....	27
2.2.2. Возбуждение электронных состояний.....	28
2.2.3. Ионизация.....	33
2.2.4. Полное сечение рассеяния.....	34
2.3. Сечения рассеяния электронов молекулярным кислородом.....	35
2.3.1. Упругое рассеяние.....	35
2.3.2. Возбуждение колебательных состояний.....	36
2.3.3. Возбуждение электронных состояний.....	37
2.3.4. Диссоциативное прилипание и диссоциация.....	41
2.3.5. Ионизация.....	42
2.3.6. Полное сечение рассеяния.....	45
2.4. Сечения рассеяния электронов молекулярным азотом.....	45
2.4.1. Упругое рассеяние.....	46
2.4.2. Возбуждение колебательных состояний.....	46
2.4.3. Возбуждение электронных состояний.....	47
2.4.4. Ионизация.....	52
2.4.5. Диссоциация.....	55
2.4.6. Полное сечение рассеяния.....	56
2.5. Дифференциальное сечение упругого рассеяния.....	57
2.6. Дифференциальные сечения ионизации.....	61
2.7. Функция потерь энергии.....	63
ГЛАВА 3. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОТОНОВ И АТОМОВ ВОДОРОДА С АТМОСФЕРНЫМИ ГАЗАМИ.....	66
3.1. Сечения взаимодействия $p$ -Н частиц с атмосферными газами.....	66
3.2. Сечения реакций перезарядки.....	66
3.3. Сечения реакций ионизации.....	70
3.4. Сечения возбуждения водородных эмиссий.....	72
3.5. Сечения возбуждения эмиссий атмосферных составляющих.....	77
3.6. Сечения упругого рассеяния.....	82
3.7. Угловое рассеяние протонов и атомов водорода.....	83
3.8. Функция потерь энергии.....	87

ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ И ПРОТОННО-ВОДОРОДНЫХ ПУЧКОВ В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО.....	91
4.1. Формализм модели.....	91
4.2. Определение длины свободного пробега.....	92
4.3. Определение типа соударения и потерь энергии.....	96
4.4. Определение углов рассеяния.....	97
4.4.1. Однократное рассеяние.....	97
4.4.2. Многократное рассеяние.....	99
4.5. Моделирование лабораторных и ракетных экспериментов.....	103
4.5.1. Пучки электронов.....	103
4.5.2. Протонно-водородные потоки.....	106
4.6. Оценка статистической точности.....	109
ГЛАВА 5. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОХОЖДЕНИЯ ПОТОКОВ АВРОРАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ОДНОРОДНЫХ ГАЗАХ И АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ.....	111
5.1. Интегральные характеристики переноса потоков авроральных электронов.....	111
5.1.1. Пространственное распределение выделившейся энергии и интегральные длины пробегов.....	112
5.1.2. Интегральные альbedo-потоки.....	120
5.1.3. Функция диссипации энергии.....	121
5.2. Энергетическое и угловое распределение авроральных электронов в атмосфере Земли.....	125
5.2.1. Особенности энергетических спектров авроральных электронов.....	125
5.2.2. Роль вторичных электронов в формировании энергетического спектра.....	128
5.2.3. Анализ результатов теоретических расчетов.....	130
5.2.4. Особенности структуры энергетических спектров в интервале 10-100 эВ.....	133
5.2.5. Особенности углового распределения авроральных электронов.....	136
5.3. Особенности переноса авроральных электронов в атмосфере Земли.....	140
5.3.1. Влияние магнитного поля Земли на интегральные характеристики переноса авроральных электронов.....	141
5.3.2. Влияние магнитного поля Земли на дифференциальные характеристики переноса авроральных электронов.....	146
ГЛАВА 6. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОХОЖДЕНИЯ ПОТОКОВ АВРОРАЛЬНЫХ ПРОТОНОВ В ОДНОРОДНЫХ ГАЗАХ И В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ.....	149
6.1. Пространственное распределение выделившейся энергии и интегральные длины пробегов.....	149
6.2. Влияние магнитного поля Земли на интегральные и дифференциальные характеристики переноса.....	156
6.2.1. Интегральные альbedo-потоки.....	156
6.2.2. Высотный профиль выделения энергии.....	159
6.2.3. Радиальное растопление лучка.....	162
6.2.4. Эволюция зарядового состава лучка.....	163
6.3. Особенности прохождения протонно-водородных потоков в атмосфере Земли.....	165

<b>ГЛАВА 7. ВОЗБУЖДЕНИЕ И ИОНИЗАЦИЯ <math>N_2</math>, <math>O_2</math> И <math>O</math> ЭЛЕКТРОННЫМИ И ПРОТОННЫМИ ПОТОКАМИ.....</b>	<b>167</b>
7.1. Полярная ионосфера как неравновесная плазма.....	167
7.2. Функция распределения по внутренним степеням свободы.....	168
7.3. Особенности распределения энергии по электронным и колебательным уровням $N_2$ , $O_2$ и $O$ .....	169
7.4. Роль электронов ионизационного каскада.....	177
7.5. Характеристики ионизации для протонных высыпаний.....	180
7.6. Скорость образования возбужденных молекул и атомов в атмосфере Земли.....	184
7.6.1. Дифференциальные энергетические цены.....	184
7.6.2. Высотные профили скорости образования возбужденных молекул и атомов в атмосфере Земли.....	188
7.6.3. Поведение энергетических цен на низких энергиях.....	193
7.6.4. Влияние примеси ионизованной компоненты.....	195
7.7. Пространственная структура ионообразования в протонных высыпаниях.....	219
7.7.1. Используемые транспортные модели.....	219
7.7.2. Коррекция профилей ионообразования на альbedo-поток.....	221
7.7.3. Коррекция профилей ионообразования на радиальное расплывание пучка.....	224
7.7.4. Сравнение с экспериментальными данными.....	228
7.8. Дополнительная ионизация в $F_2$ -слое.....	233
7.9. Моделирование активного эксперимента.....	234
7.10. Вариации интенсивности эмиссий полярных сияний в области совместных e-p-H-высыпаний в зависимости от параметров потоков выпадающих частиц.....	235
7.10.1. Сравнение эмиссий полярных сияний, вызванных электронными и протонными высыпаниями.....	238
7.10.2. Диагностика параметров выпадающих потоков при совместном e-p-H-высыпании.....	240
<b>ЛИТЕРАТУРА.....</b>	<b>244</b>
<b>ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ.....</b>	<b>260</b>

Научное издание

Владимир Евгеньевич Иванов, Борис Владимирович Козелов

ПРОХОЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ И ПРОТОННО-  
ВОДОРОДНЫХ ПУЧКОВ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Редактор В.И.Хяргинен

Технический редактор В.А.Ганичев

Лицензия ПД 00801 от 06 октября 2000 г.

Подписано к печати 10.05.2001

Формат бумаги 70x108 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Гарнитура Times/Cyrillic

Усл.печ.л. 23.1. Заказ № 62. Тираж 400 экз.

---

*Российская Академия Наук*

Ордена Ленина Кольский научный центр им.С.М.Кирова  
184209, Апатиты, Мурманская область, ул.Ферсмана, 14