

Р. Уиттен, И. Поппов

Основы аэрономии

Перевод с английского

Э. С. КАЗИМИРОВСКОГО И И. А. КРИНБЕРГА

Под редакцией

д-ра физ.-мат. наук

А. Д. ДАНИЛОВА

д-ра физ.-мат. наук

Э. С. КАЗИМИРОВСКОГО

30361



Гидрометеоиздат · Ленинград · 1977



Space science text series

Fundamentals of Aeronomy

R. C. WHITTEN, Chief, Planetary
Environments Branch

I. G. POPPOFF, Assistant Chief,
Space Science Division
Ames Research Center

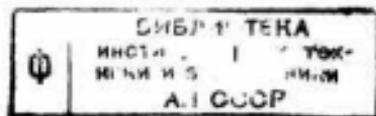
National Aeronautics and Space Administration

John Wiley & Sons, Inc.

New York · London · Sydney · Toronto

Аэрономия — наука о сложном комплексе разнообразных явлений, происходящих в верхней атмосфере Земли и других планет. В книге Р. Уиттена и И. Попова дано последовательное изложение основных физических принципов, лежащих в основе аэрономии, и подробно проиллюстрированы их приложения к решению основных аэрономических проблем. Излагаются элементы электродинамики, термодинамики, кинетической теории газов, атомной и молекулярной спектроскопии, химической кинетики. Рассмотрены гидродинамические процессы в верхней атмосфере — ветры, приливы, внутренние гравитационные волны, турбулентность. Большое внимание уделяется теории аэрономических явлений, их морфологии и интерпретации. Рассматривается структура нижней, средней и верхней ионосферы, включая вопросы ионообразования, формирования слоев, уравнений баланса, теплопроводности и аномальных явлений. Освещены проблемы образования и движения неоднородностей, ионосферные возмущения и спорадические образования.

Книга рассчитана на широкий круг научных работников и специалистов в области метеорологии, геофизики, космических исследований, а также инженеров, занимающихся вопросами, связанными с процессами в верхней атмосфере. Она может быть с успехом использована студентами старших курсов и аспирантами соответствующих специальностей в качестве учебного и справочного пособия.



Оглавление

Предисловие редакторов перевода	10
Предисловие	13
1. Введение	15
1.1. Исторические сведения	17
1.1.1. Полярные сияния	—
1.1.2. Свечение атмосферы	18
1.1.3. Ионосфера	—
1.2. Предмет астрономии	19
1.2.1. Атмосферы	20
1.2.2. Излучения	22
1.2.3. Взаимодействия	29
1.2.4. Слои и области	30
1.3. Недостатки наших знаний	34
1.4. Перспективы исследований	—
2. Основные физические принципы	36
2.1. Электродинамика	—
2.1.1. Основные уравнения	—
2.1.2. Уравнение электромагнитных волн	38
2.1.3. Электрические свойства плазмы (плазменная частота)	39
2.1.4. Поток энергии	40
2.2. Термодинамика	41
2.2.1. Первый и второй законы термодинамики	—
2.2.2. Термодинамика идеального газа	44
2.2.3. Различные термодинамические уравнения	45
2.3. Кинетическая теория газов	—
2.3.1. Функция распределения	46
2.3.2. Уравнение состояния идеального газа	47
2.3.3. Уравнение Больцмана	48
2.3.4. Больцмановские уравнения переноса и их приложения	49
2.3.5. Дебаевское экранирование в плазме	52
2.4. Строение атомов и молекул и спектры	53
2.4.1. Спектр черного тела и коэффициенты Эйнштейна	54
2.4.2. Строение атомов	55
2.4.3. Строение молекул	62
2.4.4. Атомные спектры	63
2.4.5. Молекулярные спектры	66
2.5. Процессы столкновений	67
2.5.1. Теория столкновений	—
2.5.2. Фотопроцессы	72

2.5.3. Прохождение заряженных частиц через вещество	75
2.5.4. Соударения низкоэнергичных электронов	76
2.6. Реакции	78
2.6.1. Кинетика реакций	—
2.6.2. Рекомбинация ионов	79
2.6.3. Отрицательные ионы и их реакции	80
2.6.4. Ионно-молекулярные реакции	81
2.6.5. Скорости химических реакций	82
3. Физическая аэрономия	87
3.1. Гидростатика	88
3.2. Нагрев верхней атмосферы	90
3.2.1. Приток энергии	—
3.2.2. Перенос тепла за счет теплопроводности	93
3.2.3. Перенос тепла излучением	95
3.3. Механическое и химическое равновесие в верхней атмосфере Земли	98
3.4. Молекулярная диффузия	99
3.5. Вариации параметров верхней атмосферы	102
3.6. Измерение атмосферных параметров	106
3.6.1. Плотность	—
3.6.2. Температура	112
3.6.3. Диффузия	114
3.6.4. Наблюдения планетных атмосфер с помощью космических аппаратов	115
3.7. Модели атмосферы	118
3.7.1. Модель Хэрисса — Пристера	—
3.7.2. Эмпирические модели	124
3.7.3. Модели атмосфер Венеры и Марса	126
3.7.4. Модели атмосферы Юпитера	—
3.8. Планетарные экзосферы	127
3.8.1. Теория экзосферы	128
3.8.2. Экзосфера Земли (геокоорона)	130
3.8.3. Экзосфера Венеры	131
4. Химическая аэрономия	136
4.1. Диссоциация и рекомбинация	137
4.1.1. Реакции фотодиссоциации	140
4.1.2. Реакции рекомбинации	152
4.1.3. Деактивация возбужденных атомов кислорода	154
4.2. Ионизация, рекомбинация и обменные реакции	155
4.3. Фотохимическое равновесие	156
4.3.1. Земная атмосфера	157
4.3.2. Атмосферы Марса и Венеры	164
5. Гидродинамика аэрономии	172
5.1. Основы гидродинамики	173
5.1.1. Уравнения движения	—
5.1.2. Теория возмущений	175
5.1.3. Физический смысл N	176
5.1.4. Географическое приближение и тепловой ветер	178

5.1.5. Завихренность и циклогенез	179
5.1.6. Атмосферные колебания	181
5.2. Внутренние гравитационные волны	—
5.3. Приливные колебания	184
5.4. Ветры и циркуляция	190
5.4.1. Мезосфера	—
5.4.2. Термосфера	193
5.4.3. Наблюдения за ветром	194
5.5. Турбулентность в верхней атмосфере	—
5.5.1. Теория турбулентности	195
5.5.2. Перенос массы и тепла	200
6. Оптические явления	206
6.1. Механизмы излучения	207
6.1.1. Резонанс и флуоресценция	—
6.1.2. Хемилюминесценция	—
6.1.3. Возбуждение заряженными частицами	208
6.1.4. Передача энергии	209
6.1.5. Интенсивность излучения	210
6.2. Свечение атмосферы	—
6.2.1. Дневное свечение атмосферы	—
6.2.2. Сумеречное свечение	217
6.2.3. Свечение ночного неба	220
6.2.4. Венера	223
6.2.5. Марс	224
6.3. Полярные сияния	225
6.3.1. Морфология	—
6.3.2. Механизмы возбуждения	229
6.3.3. Спектры полярных сияний	231
6.3.4. Красные полярные сияния	237
6.3.5. Свечение в полярной шапке	238
6.3.6. Другие планеты	239
7. Электрические токи в верхней атмосфере	242
7.1. Ионосферная проводимость	245
7.1.1. Движение частиц плазмы в магнитном поле	—
7.1.2. Тензор проводимости плазмы в магнитном поле	247
7.1.3. Электрическая проводимость в средней ионосфере	249
7.1.4. Проводимость ионосферы на очень больших высотах	252
7.2. Динамо-теория	—
7.3. Магнитные возмущения	257
7.4. Дрейфы в области F ионосферы	258
7.5. Токи на границе раздела между солнечным ветром и ионосферой для планет, не имеющих магнитного поля	259
8. Структура нижней и средней ионосферы	263
8.1. Образование электронно-ионных пар	—
8.1.1. Фотоионизация	265
8.1.2. Ионизация корпускулами	267
8.2. Кинетика ионных реакций	268
8.3. Равновесие	271

8.4. Ионосферные области	276
8.4.1. Область D	277
8.4.2. Область E	287
8.4.3. Область F1	294
8.5. Вариации	296
8.5.1. Суточные вариации	—
8.5.2. Сезонные вариации	298
8.5.3. Гелиоциклические вариации	299
9. Структура верхней ионосферы	304
9.1. Образование слоя F2	305
9.1.1. Фотоионизация	306
9.1.2. Исчезновение электронов	—
9.1.3. Амбилярная диффузия	308
9.2. Уравнение непрерывности	309
9.2.1. Решение для простых моделей слоя F2	310
9.2.2. Многокомпонентная внешняя ионосфера	314
9.2.3. Слой F2 в экваториальных широтах	315
9.2.4. Нестационарная модель слоя F2	316
9.3. Аномалии	318
9.3.1. Электродинамические дрейфы	—
9.3.2. Ночная ионизация	320
9.3.3. Географические аномалии	—
9.3.4. Временные аномалии	322
9.4. Тепловые свойства слоя F2	323
9.4.1. Энергетический спектр фотоэлектронов	—
9.4.2. Механизмы потерь энергии	325
9.4.3. Охлаждение электронно-ионного газа. Теплопроводность	329
9.4.4. Нелокальный приток энергии	331
9.4.5. Уравнения теплового баланса для ионосферы	332
9.4.6. Изменение температуры электронов и ионов	335
9.5. Протоносфера	338
9.6. F-рассеяние и другие неоднородности в верхней ионосфере	340
9.7. Перемещающиеся ионосферные возмущения	344
9.8. Верхние ионосферы других планет	—
9.8.1. Дневная верхняя ионосфера Венеры	345
9.8.2. Тепловая структура ионосферы Венеры	347
10. Возмущения в ионосфере	351
10.1. Возмущения, вызываемые электромагнитным излучением	352
10.1.1. Солнечные протонные вспышки	—
10.1.2. Наблюдавшиеся эффекты	356
10.1.3. Уравнения баланса	357
10.1.4. Примеры	360
10.2. Возмущения, вызываемые корпускулярной радиацией	362
10.2.1. Солнечные протонные вспышки	363
10.2.2. Авроральные электроны	366
10.2.3. Ионосферные эффекты	371
10.2.4. Уравнения баланса	372
10.3. Ионосферные бури	388
10.4. Слой E-спорадический	390
10.5. Солнечные затмения	393
Приложение	397
Список обозначений	402
Физические константы	407

Р. Унттен, И. Поппов
Основы аэрономии

Редактор Е. И. Ильиних. Художник В. В. Бабанов.
Художественный редактор Б. А. Демиховский. Технический редактор Л. М. Шншкова.
Корректоры: В. И. Гинцбург, Г. С. Макарова
ИБ № 124

Сдано в набор 19/X 1976 г. Подписано к печати 22/II 1977 г. Формат 60X90¹/₁₆. Бумага
тип. № 1. Печ. л. 25,5. Уч.-изд. л. 24,9. Тираж 1400 экз. Индекс МЛ-221. Заказ № 2258.
Цена 3 руб. 20 коп. Гидрометеондат. 199053. Ленинград 2-я линия, д. 23.

Ленинградская типография № 4 Союзполиграфпрома при Государственном комитете Со-
вета Министров СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли, 196126,
Ленинград, Ф-126, Социалистическая ул., 14.