

# ПЛАЗМЕННАЯ ГЕЛИОГЕОФИЗИКА

ТОМ I

Под редакцией академика РАН Л. М. Зеленого  
и д. ф.-м. н. И. С. Веселовского



МОСКВА  
ФИЗМАТЛИТ®  
2008

УДК 523; 533.9  
ББК 22.65; 22.632  
П 37

*Рукопись подготовлена  
в рамках программы Отделения физических наук РАН 2003–2008 гг.  
ОФН-16 «Плазменные процессы в Солнечной системе»*

**Плазменная гелиогеофизика. В 2 т. Т. I / Под ред. Л.М. Зеленого, И.С. Веселовского. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. — 672 с. — ISBN 978-5-9221-1040-2.**

Плазменная гелиогеофизика занимается проблемами, в основе которых лежат процессы, происходящие в космическом пространстве и описываемые в рамках электродинамики и физики плазмы. Книга написана ведущими российскими специалистами и представляет собой монографию, отражающую современный уровень исследований, основные достижения, проблемы и нерешенные вопросы. Первый том посвящен физике Солнца, солнечного ветра, гелиосферы и магнитосферы Земли. Во второй том вошли главы, посвященные ионосфере Земли и планет, солнечно-земным связям, взаимодействию солнечного ветра с различными объектами Солнечной системы, пылевой плазме, основным понятиям физики плазмы.

Книга предназначена специалистам в области физики плазмы, космической физики, студентам и учащимся. Отдельные ее материалы могут быть использованы в качестве справочного и учебного пособия также более широким кругом читателей.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

## Том I

Предисловие . . . . .	11
<b>Глава 1. Солнце. Общие сведения (Под ред. А.Б. Струминского, М.А. Лившица)</b>	<b>14</b>
Введение к главам 1 и 2 (М.А. Лившиц, А.В. Степанов) . . . . .	14
1.1. Солнце как звезда (М.А. Лившиц) . . . . .	15
1.2. Внутреннее строение Солнца (Ю.Д. Жугжда, А.Б. Струминский) . . . . .	18
1.2.1. Внутреннее строение Солнца . . . . .	18
1.2.2. Источник энергии Солнца и нейтринная астрономия . . . . .	21
1.2.3. Гелиосейсмология . . . . .	25
1.3. Структура и излучение солнечной атмосферы (М.А. Лившиц) . . . . .	32
1.3.1. Фотосфера и явления в ней . . . . .	32
1.3.2. Хромосфера. Переходная область между хромосферой и короной . . . . .	34
1.3.3. Корона . . . . .	37
1.4. Магнитные поля и индексы активности (В.Н. Обридко) . . . . .	41
1.4.1. Тонкая структура магнитных полей на Солнце . . . . .	41
1.4.2. Крупномасштабные магнитные поля и их глобальная структура . . . . .	44
1.4.3. Солнечные циклы и индексы активности . . . . .	48
1.4.4. Локальные магнитные поля и активные области . . . . .	57
1.5. Солнечные вспышки: результаты наблюдений и газодинамические процессы (М.А. Лившиц) . . . . .	60
1.5.1. Общие сведения о наблюдениях в различных диапазонах и сценарий вспышек . . . . .	60
1.5.2. Жесткие рентгеновские всплески на Солнце и отклик хромосферы на импульсный нагрев . . . . .	66
1.5.3. Длительные вспышки . . . . .	74
1.6. Корональные выбросы массы (В.Д. Кузнецов) . . . . .	81
1.6.1. Наблюдения и морфология СМЕ . . . . .	81
1.6.2. Связь СМЕ с другими видами активности . . . . .	91
1.6.3. Модели СМЕ . . . . .	95
1.7. Эруптивные протуберанцы (Б.П. Филиппов) . . . . .	98
1.8. Современные наземные и космические методы исследования короны (О.Г. Бадалян, С.В. Кузин, С.А. Богачев, И.А. Житник, В.М. Богод) . . . . .	107
1.8.1. Наблюдения короны в оптическом диапазоне . . . . .	107
1.8.2. Современные космические методы исследования короны в коротковолновой области спектра . . . . .	110
1.8.3. Радиоастрономический метод исследования солнечной короны . . . . .	115
1.9. Высокоэнергичное нейтральное излучение Солнца (А.Б. Струминский) . . . . .	123
<b>Приложение 1. Исследование вспышек и других эруптивных процессов в солнечной атмосфере по данным эксперимента СПИРИТ (С.А. Богачев, С.В. Кузин, В.А. Слемзин, А.М. Урнов) . . . . .</b>	<b>140</b>
Введение . . . . .	140
1.1. Основы метода изображающей спектроскопии . . . . .	141
1.2. Диагностика процессов в горячей плазме по ВУФ и рентгеновскому излучению . . . . .	142
1.3. Источники мягкого рентгеновского излучения в солнечной короне . . . . .	151
1.4. Динамика эруптивных процессов в переходном слое и нижней короне Солнца . . . . .	155
Заключение . . . . .	159
<b>Глава 2. Физика плазмы атмосферы Солнца (Под ред. А.В. Степанова, А.Б. Струминского) . . . . .</b>	<b>160</b>
2.1. Параметры плазмы и магнитного поля в атмосфере Солнца (А.В. Степанов) . . . . .	160

2.2. Структурные элементы солнечной короны (А. М. Садовский) . . . . .	163
2.2.1. Простая модель петли . . . . .	164
2.2.2. Функция нагрева и устойчивость петли . . . . .	168
2.2.3. Законы подобия петли . . . . .	168
2.2.4. Развитие гидростатических моделей петли . . . . .	170
2.2.5. Модели нагрева корональной плазмы . . . . .	174
2.2.6. Баланс энергии в петле . . . . .	181
2.2.7. Неустойчивости в корональных петлях . . . . .	181
2.3. Магнитные арки — фундаментальная структура короны (В. В. Зайцев, А. В. Степанов) . . . . .	183
Введение . . . . .	183
2.3.1. Арка — эквивалентный электрический (RLC)-контур . . . . .	184
2.3.2. Корональная арка — резонатор для МГД-волн . . . . .	199
2.3.3. Корональная арка — магнитная ловушка . . . . .	204
2.4. Волны и кинетические неустойчивости в короне Солнца (Е. Я. Злотник) . . . . .	205
2.4.1. Электромагнитные волны в плазме солнечной короны . . . . .	206
2.4.2. Неустойчивости в корональной плазме . . . . .	210
2.5. МГД-волны на Солнце (Ю. Д. Жужжда) . . . . .	215
2.5.1. Волны в магнитных трубках . . . . .	216
2.5.2. Волны в солнечных пятнах . . . . .	221
2.6. Локальная гелиосейсмология (Ю. А. Наговицын, А. А. Соловьёв) . . . . .	225
2.7. Основные модели вспышек (А. В. Степанов) . . . . .	232
2.7.1. Модели одиночных вспышечных петель . . . . .	232
2.7.2. Модели взаимодействующих петель . . . . .	233
2.8. Ускорение заряженных частиц во вспышках и особенности их распространения (В. В. Зайцев, А. В. Степанов) . . . . .	236
2.8.1. Данные наблюдений . . . . .	236
2.8.2. Механизмы ускорения . . . . .	237
2.8.3. Область ускорения: хромосфера или корона? . . . . .	237
2.8.4. Потоки ускоренных электронов . . . . .	238
2.8.5. Импульсный и пульсирующий режимы ускорения . . . . .	240
2.8.6. Ток ускоренных электронов. Парадокс Колгейта . . . . .	241
2.8.7. Турбулентный режим распространения энергичных частиц . . . . .	242
2.9. Механизмы нагрева короны (В. В. Зайцев) . . . . .	243
2.9.1. Нагрев плазмы вблизи солнечных пятен . . . . .	243
2.9.2. Основные уравнения . . . . .	245
2.9.3. Функция нагрева для корональной плазмы. Роль гелия . . . . .	248
2.9.4. Функция нагрева для корональных арок . . . . .	249
2.9.5. Диссипация магнитного поля . . . . .	251
2.9.6. Желобковая неустойчивость и филаментация магнитных петель . . . . .	251
2.10. Солнечно-звездная физика (М. М. Кацова, М. А. Лившиц) . . . . .	253
Введение . . . . .	253
2.10.1. Место солнечной активности среди процессов на звездах . . . . .	255
2.10.2. Звездные короны . . . . .	260
2.10.3. Вспышки на активных звездах поздних спектральных классов . . . . .	263
<b>Глава 3. Гелиосфера (Под ред. И. С. Веселовского, Ю. И. Ермолаева) . . . . .</b>	<b>269</b>
3.1. Введение (И. С. Веселовский, Ю. И. Ермолаев) . . . . .	269
3.2. Солнечный ветер и внутренняя гелиосфера. Источники солнечного ветра в короне (И. В. Чашей) . . . . .	272
3.2.1. Типичные параметры плазмы солнечного ветра . . . . .	272
3.2.2. О теоретических моделях солнечного ветра . . . . .	274
3.2.3. Самосогласованная модель короны и солнечного ветра с волновыми источниками импульса и тепла . . . . .	275
3.2.4. Корональные источники солнечного ветра, быстрый и медленный ветер . . . . .	278
3.3. МГД-моделирование крупномасштабной структуры солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (Ю. В. Писанко) . . . . .	280

3.3.1. Как устроена внутренняя гелиосфера . . . . .	280
3.3.2. Уравнения . . . . .	285
3.3.3. Сверхзвуковой сверхальвеновский ветер . . . . .	288
3.3.4. Полярный солнечный ветер . . . . .	290
3.3.5. Корона вблизи плоскости эклиптики . . . . .	295
3.3.6. Глобальные модели . . . . .	305
3.3.7. Переполусовка . . . . .	306
3.4. Ионные составляющие солнечного ветра (И. С. Веселовский, Ю. И. Ермолаев) . . . . .	313
3.4.1. Введение . . . . .	313
3.4.2. Химический состав солнечной короны и солнечного ветра . . . . .	316
3.4.3. Ионизационно-рекомбинационные процессы в солнечной короне и ионизационная температура солнечного ветра . . . . .	319
3.4.4. Функции распределения ионов по скоростям и их первые моменты: плотность, массовая скорость и температура . . . . .	322
3.4.5. Некоторые модели . . . . .	325
3.5. Мелкомасштабные и нестационарные процессы: турбулентность и волны (Г. Н. Застенкер, И. В. Чашей) . . . . .	328
3.5.1. Турбулентность солнечного ветра по данным локальных измерений . . . . .	328
3.5.2. Турбулентность солнечного ветра по данным радиопросвечивания . . . . .	337
3.5.3. МГД-волны и турбулентность . . . . .	341
3.6. Энергичные частицы и космические лучи: галактические, гелиосферные и солнечные космические лучи (Г. А. Базилевская, Ю. И. Стожков) . . . . .	345
3.6.1. Введение . . . . .	345
3.6.2. Основные характеристики галактических космических лучей (ГКЛ) . . . . .	345
3.6.3. Методы наблюдений ГКЛ . . . . .	347
3.6.4. Модуляционные эффекты ГКЛ (11- и 22-летний циклы, 27-дневные и суточные вариации, форбуш-понижения) . . . . .	347
3.6.5. Аномальная компонента космических лучей . . . . .	349
3.6.6. Космические лучи и атмосферные процессы . . . . .	351
3.6.7. Основные характеристики солнечных космических лучей (СКЛ) . . . . .	352
3.6.8. О происхождении СКЛ . . . . .	354
3.6.9. СКЛ в межпланетной среде . . . . .	356
3.6.10. Заключение . . . . .	357
3.7. Структура и свойства внешней гелиосферы (В. В. Измоденов) . . . . .	358
3.7.1. Введение . . . . .	358
3.7.2. Обзор подходов для описания различных компонент . . . . .	359
3.7.3. Обзор современных моделей гелиосферного интерфейса . . . . .	363
3.7.4. Заключение . . . . .	375
<b>Глава 4. Магнитосфера Земли (Под ред. В. Ю. Трахтенгерца, А. Г. Демехова) . . . . .</b>	<b>377</b>
4.1. Введение . . . . .	377
4.2. Взаимодействие солнечного ветра с внешней магнитосферой Земли (О. Л. Вайсберг, В. Н. Смирнов, Г. Н. Застенкер, С. П. Савин, М. И. Веригин) . . . . .	378
4.2.1. Околосферная ударная волна . . . . .	378
4.2.2. Магнитослой . . . . .	389
4.2.3. Магнитопауза и пограничные слои магнитосферы . . . . .	398
4.2.4. Аналитические представления формы фронта околопланетных ударных волн . . . . .	412
4.3. Магнитное поле и основные токовые системы магнитосферы (И. И. Алексеев, В. В. Калегаев) . . . . .	422
4.3.1. Основные токовые системы в магнитосфере Земли . . . . .	422
4.3.2. Модели геомагнитного поля . . . . .	425
4.3.3. Магнитосферные токовые системы во время магнитных бурь . . . . .	430
4.4. Структура и динамика «хвоста» магнитосферы (Х. В. Малова, Л. М. Зелёный) . . . . .	434

4.4.1. Структура и динамика магнитосферного хвоста . . . . .	434
4.4.2. Тонкие токовые слои в магнитосфере Земли . . . . .	442
4.4.3. Плазменные неустойчивости токовых слоев в бесстолкновительной плазме . . . . .	460
4.4.4. Магнитосферная суббурия: основные проявления и возможные механизмы	465
4.5. Внутренняя магнитосфера (Г. А. Котова, А. С. Леонович, В. А. Мазур, А. С. Ко- втюх, М. И. Панасюк, <b>В. Ю. Трахтенгерц</b> , А. Г. Демехов) . . . . .	484
4.5.1. Плазмосфера . . . . .	484
4.5.2. Волновые явления во внутренней магнитосфере . . . . .	496
4.5.3. Радиационные пояса Земли . . . . .	510
4.5.4. Буревой кольцевой ток . . . . .	534
4.5.5. Магнитосферные циклотронные мазеры . . . . .	552
4.6. Ионосферно-магнитосферное воздействие и физика авроральных явлений (Б. В. Козелов, В. А. Пилипенко, <b>В. Ю. Трахтенгерц</b> ) . . . . .	569
4.6.1. Полярные сияния — отражение процессов в магнитосферно-ионосферной системе . . . . .	569
4.6.2. Импульсные и волновые возмущения в ночной магнитосфере . . . . .	576
4.6.3. Турбулентный альвеновский погранслои . . . . .	583
Список литературы . . . . .	587
Предметный указатель . . . . .	664