

ПЛАЗМЕННАЯ ГЕЛИОГЕОФИЗИКА

ТОМ II

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



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2008

54219

УДК 523; 533.9
ББК 22.65; 22.632
П 37



Издание осуществлено при поддержке
Российского фонда фундаментальных
исследований по проекту 07-02-07012

*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. II / Под ред. Л.М. Зеленого, И.С. Веселовского. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. — 560 с. — ISBN 978-5-9221-1041-9.

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
Глава 1. Солнце. Общие сведения (Под ред. А.Б. Струминского, М.А. Лившица)	14
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. Жужда, 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
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)	140
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

Глава 2. Физика плазмы атмосферы Солнца (Под ред. А. В. Степанова, А. Б. Струминского)	160
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 петель	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. Жуежда)	215
2.5.1. Волны в магнитных трубках	216
2.5.2. Волны в солнечных пятнах	221
2.6. Локальная гелиосейсмология (Ю. А. Назовицын, 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
Глава 3. Гелиосфера (Под ред. И. С. Веселовского, Ю. И. Ермолаева)	269
3.1. Введение (И. С. Веселовский, Ю. И. Ермолаев)	269
3.2. Солнечный ветер и внутренняя гелиосфера. Источники солнечного ветра в короне (И. В. Чашев)	272
3.2.1. Типичные параметры плазмы солнечного ветра	272
3.2.2. О теоретических моделях солнечного ветра	274

3.2.3. Самоогласованная 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 сверхальевенский 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. Базилювская, 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. Измоделов)	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
Глава 4. Магнитосфера Земли (Под ред. В. Ю. Трахтенгерца, А. Г. Демехова)	377
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. Магнитоплазма 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 суббура: 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, В. Ю. Трахтенгерц, 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, В. Ю. Трахтенгерц)	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

Том II

Глава 5. Магнитосферы планет и взаимодействие солнечного ветра с малыми и немагнитными телами Солнечной системы (Под ред. А. А. Скальского)	11
5.1. Взаимодействие комет с солнечным ветром (М. И. Веригин)	12
5.1.1. Обзор физических процессов в окрестности комет	12
5.1.2. Ускорение кометных ионов в солнечном ветре	18
5.1.3. Пространственное распределение нейтрального газа	22
5.1.4. Торможение солнечного ветра до ударной волны	25
5.1.5. Околокометная ударная волна	27
5.1.6. Кометошит	30
5.1.7. Кометоплауза	36
5.1.8. Область кометной плазмы	42
5.1.9. Контактная поверхность и ионосфера	47
5.2. Взаимодействие солнечного ветра с Венерой и Марсом (М. И. Веригин, А. А. Скальский)	49
5.2.1. Введение	49
5.2.2. Прямое воздействие солнечного ветра на ионосферу Венеры, наведенная магнитосфера	51
5.2.3. Область форшока, околопланетная ударная волна и магнитослой	53
5.2.4. Ионопауза и магнитный барьер	54
5.2.5. Магнитные жгуты в ионосфере	55
5.2.6. Магнитный хвост Венеры	55
5.2.7. Особенности взаимодействия Марса с солнечным ветром	57
5.3. Магнитосфера Меркурия (А. А. Скальский)	60
5.4. Магнитосфера Юпитера (И. И. Алексеев, Е. С. Беленькая, П. А. Беспалов)	61
5.4.1. Введение	61
5.4.2. Модели юпитерианской магнитосферы	62
5.4.3. Параболическая модель	63
5.4.4. Некоторые особенности коллективных процессов в магнитосфере быстро-вращающегося Юпитера	74
5.5. Магнитное окружение Луны (А. М. Садовский)	82
5.5.1. Магнетизм Луны	83
5.5.2. Взаимодействие Луны с солнечным ветром и магнитосферой Земли	87
Глава 6. Ионосфера Земли (М. Г. Дёминов)	92
6.1. Уравнения переноса	96
6.1.1. Нейтральная составляющая атмосферы	98
6.1.2. Концентрация электронов и ионов	100
6.1.3. Температура электронов и ионов	109
6.1.4. Электрические поля и токи	113
6.2. Ионизационно-рекомбинационные процессы	117
6.3. Средние широты	124
6.3.1. Невозмущенные условия	124
6.3.2. Внезапное ионосферное возмущение	134
6.3.3. Суббура	134
6.3.4. Буря	139
6.4. Низкие широты	141
6.4.1. Экваториальная аномалия	141
6.4.2. Экваториальные пузыри	144
6.4.3. Сверхохлаждение электронов и ионов	146
6.4.4. Возмущенные условия	147
6.5. Высокие широты	150
6.5.1. Конвекция	151
6.5.2. Авроральная область	154
6.5.3. Субавроральная область	157

Глава 7. Ионосферы планет (Н.А. Арманд, Т.К. Бреус)	164
7.1. Ионосфера Марса	164
7.2. Ионосфера Венеры	170
Глава 8. Солнечно-земные связи и космическая погода (Под ред. А.А. Петруковича)	175
8.1. Введение (А.А. Петрукович)	175
8.2. Система солнечно-земных связей (А.А. Петрукович, А.В. Дмитриев, А.Б. Струминский)	176
8.2.1. Общие положения	176
8.2.2. Солнечное магнитное поле и солнечная активность	176
8.2.3. Излучение Солнца	178
8.2.4. Магнитосфера Земли	184
8.2.5. Ионосфера и атмосфера	190
8.3. Эффекты космической погоды (А.А. Петрукович, Т.К. Бреус, М.Г. Дёминов, А.В. Дмитриев, А.А. Кривоулицкий, В.М. Петров, С.А. Пулинец, О.М. Распопов, Ю.А. Назовицын, Л.Д. Трищенко, О.А. Трошичев)	192
8.3.1. Космическая радиация	193
8.3.2. Ионосфера и распространение радиоволн	202
8.3.3. Изменение орбит спутников	210
8.3.4. Геомагнитные возмущения и системы энергоснабжения и проводной связи	213
8.3.5. Воздействие солнечной активности на атмосферные процессы и климат	219
8.3.6. Гелиобиология	229
8.4. Прогноз гелиогеофизической обстановки (А.А. Петрукович, А.В. Белов, В.Н. Обридко)	235
8.4.1. Введение	235
8.4.2. История и сегодняшний день прогноза	236
8.4.3. Прогнозирование солнечной активности	238
8.4.4. Прогноз геомагнитной активности	243
8.4.5. Геомагнитный прогноз по солнечному ветру	248
8.4.6. Прогноз СКЛ	249
8.4.7. Перспективные методики прогноза	250
8.4.8. Достоверность прогноза	251
8.4.9. Выводы	252
8.5. Заключение (А.А. Петрукович)	252
8.6. Приложение. Ресурсы сети Интернет по солнечно-земной физике (А.А. Петрукович, А.Н. Зайцев)	253
Глава 9. Лабораторное моделирование, некоторые методы измерения и активные эксперименты (Под ред. А.Г. Франк)	258
Введение	258
9.1. Лабораторное моделирование: эволюция и динамика токовых слоев в плазме как основа вспышечных явлений (А.Г. Франк)	259
9.1.1. О лабораторном моделировании астрофизических явлений	259
9.1.2. Токовые слои и процессы магнитного пересоединения	261
9.1.3. Ранние эксперименты: токовые слои в 2D магнитных конфигурациях	262
9.1.4. Необходимость перехода к 3D магнитным конфигурациям	265
9.1.5. Токовые слои в 3D магнитных конфигурациях с нулевыми точками	266
9.1.6. Токовые слои в 3D магнитных конфигурациях с X линиями	268
9.1.7. Основные проявления вспышечных процессов в токовых слоях	272
9.1.8. Сопоставление лабораторных экспериментов по динамике токовых слоев и астрофизических явлений вспышечного типа	273
9.2. Лабораторное моделирование распространения низкочастотных волн в околоземной плазме (А.В. Костров, М.Е. Гуцкий, С.В. Коробков, А.В. Стриковский)	275
9.2.1. Условия моделирования волновых явлений в лабораторной плазме: параметры подобия	276

9.2.2. Общая характеристика волн свистового диапазона частот	277
9.2.3. Проблемы лабораторного моделирования низкочастотных волновых процессов в околоземной плазме и требования, предъявляемые к плазменным установкам	278
9.2.4. Описание экспериментальной установки	280
9.2.5. Исследование распространения свистовых волн в неоднородных плазменных структурах	281
9.2.6. Волны свистового диапазона частот в плазме с нестационарным магнитным полем	284
9.2.7. Заключение	287
9.3. Моделирование коллективных процессов в магнитосферах планет и в солнечной короне (А. Г. Демехов)	287
9.3.1. Циклотронная неустойчивость свистовых волн в плазменных магнитных ловушках	288
9.3.2. Лабораторное моделирование других видов космических циклотронных мазеров	294
9.4. Лабораторное моделирование распространения электронного пучка в космической плазме (Д. М. Карфидов)	295
9.4.1. Электронные пучки в солнечной системе	295
9.4.2. Лабораторные эксперименты по распространению пучков в плазме	296
9.4.3. Релаксация размытого по скоростям электронного пучка в плазме	298
9.5. Антенная диагностика электромагнитных сигналов в плазме (Ю. В. Чузунюв)	302
9.5.1. Расчет среднеквадратичной ЭДС, наводимой на антенне в неравновесной плазме	303
9.5.2. Расчет спектральной плотности шумовой ЭДС	304
9.5.3. Эффективная длина приемной антенны	307
9.6. Активные эксперименты для исследований геофизических явлений в околоземном космическом пространстве (Ю. И. Зецер, Б. Г. Гаврилов, Н. Ф. Благовещенская, А. Г. Демехов, В. Ю. Трахтенгерц)	312
9.6.1. Введение	312
9.6.2. Средства и методы изучения искусственных и естественных возмущений в атмосферно-ионосферно-магнитосферной системе в активных экспериментах	313
9.6.3. Активные исследования магнитосферно-ионосферных процессов, связанных с зарождением и эволюцией плазменных образований и их взаимодействием с фоновой средой и магнитным полем	319
9.6.4. Тепловое нелинейное взаимодействие мощных КВ-радиоволн с ионосферной плазмой	338
9.6.5. Триггерное ОНЧ-излучение	342
9.7. Инжекция струй электронов и плазмы в магнитосферу и ионосферу (А. И. Морозов)	345
9.7.1. Введение	345
9.7.2. Инжекция электронных пучков в магнитосферу	346
9.7.3. Инжекция в ионосферу и магнитосферу квазинейтральной энергичной плазмы	348
9.7.4. Эксперимент «Rogscipine»	349
9.8. Радиофизические методы исследований и мониторинга ионосферы Земли (В. М. Смирнов)	351
Глава 10. Мелкодисперсные частицы и пылевая плазма в гелиогеофизике (С. И. Попель)	368
10.1. Введение	368
10.2. Пылевое облако в Солнечной системе	369
10.3. Пыль в магнитосфере Земли	371
10.4. Пыль в магнитосферах Юпитера и Сатурна	373
10.5. Заряженная пыль в ионосфере Земли	376

10.6. Наблюдательные проявления коллективных процессов в запыленной ионосфере	380
10.7. Заряженная пыль и ударно-волновые явления в Солнечной системе	384
10.8. Приповерхностная и атмосферная пыль. Шумановские резонансы	388
Заключение	390
Глава 11. Некоторые сведения по физике плазмы (Д. Р. Шкляр)	391
Список основных обозначений к гл. 11	391
11.1. Понятие плазмы	392
11.2. Методы описания плазмы.	393
11.2.1. Движение отдельных частиц	394
11.2.2. Кинетический подход Больцмана—Власова	395
11.2.3. Магнитная гидродинамика	398
11.3. Дебаевское экранирование	403
11.4. Линейные волновые процессы	405
11.4.1. Гидродинамические волны в холодной плазме	405
11.4.2. МГД-волны в плазме конечной температуры	406
11.4.3. Кинетическая теория	407
11.4.4. Затухание Ландау плазменных волн	424
11.4.5. Ионно-звуковые волны	428
11.4.6. Квазиэлектростатические волны в «теплой» плазме	429
11.4.7. Электростатические волны в горячей плазме	433
11.4.8. Резонансное взаимодействие электромагнитных волн и частиц в плазме	437
11.5. Нелинейные процессы в плазме.	444
11.5.1. Самофокусировка мощной высокочастотной волны в плазме	447
11.5.2. Модуляционная неустойчивость волновых пакетов в плазме	450
11.5.3. Уравнение Кортевега—де Вриза	452
11.5.4. Нелинейные эффекты при взаимодействии частиц с монохроматической волной конечной амплитуды	455
11.5.5. Квазилинейное приближение	460
11.5.6. Нелинейное взаимодействие волн	462
11.6. Движение заряженных частиц в сильном магнитном поле	466
11.6.1. Дипольное поле и дипольные координаты	466
11.6.2. Гамильтониан, уравнения движения и адиабатические инварианты	467
11.6.3. Скорость азимутального дрейфа	470
11.7. Механизмы ускорения частиц в плазме	470
11.7.1. Бетатронное ускорение	470
11.7.2. Ускорение Ферми	472
11.7.3. Резонансное ускорение частиц при их взаимодействии с электромагнитными волнами в неоднородной плазме	472
11.8. Неустойчивости плазмы.	475
11.8.1. Кинетические неустойчивости	475
11.8.2. Гидродинамические неустойчивости	484
11.9. Магнитное пересоединение (Л. М. Зеленый, Х. В. Малова)	490
Список литературы	495
Предметный указатель	554

Научное издание

ПЛАЗМЕННАЯ ГЕЛИОГЕОФИЗИКА

Том II

Редактор *О.В. Салецкая*
Оригинал-макет: *А.М. Садовский*
Оформление переплета: *В.М. Давыдов, А.Н. Захаров*

Подписано в печать 21.10.08. Формат 70×100/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 45,5. Уч.-изд. л. 49,0. Тираж 400 экз. Заказ № 7606.

Издательская фирма «Физико-математическая литература»
МАИК «Наука/Интерпериодика»
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 90
E-mail: fizmat@maik.ru, fmsale@maik.ru;
<http://www.fml.ru>

Отпечатано с готовых диапозитивов
в ФГУП «Производственно-издательский комбинат ВИНТИ»
140010, г. Люберцы, Московская обл., Октябрьский пр-т, 403