



МИНИСТЕРСТВО
ОБРАЗОВАНИЯ
И НАУКИ УКРАИНЫ

ХАРЬКОВСКИЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ
имени В. Н. КАРАЗИНА

Л. Ф. ЧЕРНОГОР

ФИЗИКА МОЩНОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ В ГЕОКОСМОСЕ

Монография

Харьков – 2014

УДК 538.566, 621.391.21, 550.388

ББК 26.2

Ч 49

Рецензенты:

В. М. Яковенко – академик НАН Украины (Институт радиофизики и электроники НАН Украины, г. Харьков);

Ю. М. Ямпольский – чл.-корр. НАН Украины (Радиоастрономический институт НАН Украины, г. Харьков).

*Утверждено к печати решением Ученого совета
Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина
(протокол № 10 от 3.11.2014 г.)*

Чорногор Л. Ф. Фізика потужного радіовипромінювання в геокосмосі : монографія /
Ч 49 Л. Ф. Чорногор. – Х. : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2014. – 544 с. : 183 іл., 65 табл., 674 бібл.

ISBN 978-966-285-151-9

Викладено загальні відомості про будову системи Земля–атмосфера–іоносфера–магнітосфера та її енергетику. Описані основні фізичні процеси, що виникають під час взаємодії потужного радіовипромінювання з іоносферно-магнітосферною плазмою. Викладено результати спостережень і моделювання фізичних процесів, що виникають далеко за межами діаграми спрямованості антени нагрівних стендів.

Для наукових працівників, аспірантів і студентів фізичних спеціальностей університетів.

УДК 538.566, 621.391.21, 550.388

ББК 26.2

Черногор Л. Ф. Физика мощного радиоизлучения в геокосмосе : монография /
Ч 49 Л. Ф. Черногор. – Х. : ХНУ имени В. Н. Каразина, 2014. – 544 с. : 183 ил., 65 табл., 674 библи.

ISBN 978-966-285-151-9

Изложены общие сведения о строении системы Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера и ее энергетике. Описаны основные физические процессы, возникающие при взаимодействии мощного радиоизлучения с ионосферно-магнитосферной плазмой. Изложены результаты наблюдений и моделирования физических процессов, возникающих далеко за пределами диаграммы направленности антенны нагревных стендов.

Для научных работников, аспирантов и студентов физических специальностей университетов.

УДК 538.566, 621.391.21, 550.388

ББК 26.2

Chernogor L. F. Physics of High-Power Radio Emissions in Geospace : Monograph /
Ч 49 L. F. Chernogor. – Kharkiv : Kharkiv V. N. Karazin National University, 2014. – 544 p. : 183
Figures, 65 Tables, 674 References.

ISBN 978-966-285-151-9

General information on the Earth–atmosphere–ionosphere–magnetosphere system structure and its energetics is presented. The main physical processes coupling high power radio emissions and the ionospheric and magnetospheric plasma are outlined. Observations and modeling of the basic physical effects appearing far beyond high-power heater antenna patterns are presented.

This volume is a reference book for researchers studying ionospheres and plasma physics. It also serves as a textbook for postgraduate and graduate students taking courses in physics at university level.

УДК 538.566, 621.391.21, 550.388

ББК 26.2

ISBN 978-966-285-151-9

© Харьковський національний університет
імені В. Н. Каразіна, 2014

© Черногор Л. Ф., 2014

© Дончик И. Н., макет обложки, 2014



СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	7
Список основных сокращений	9
Список основных обозначений	11
Введение	17
Литература к введению	18
Глава 1. Геокосмос в свете системной парадигмы	22
1.1. Строение геокосмоса	22
1.2. Основы системной парадигмы	24
1.2.1. Общие сведения	24
1.2.2. Основные положения системной парадигмы	26
1.2.3. Строение систем. Основные процессы	27
1.2.4. Свойства систем	33
1.2.5. Энергетика процессов	34
1.2.6. Потoki энергии	52
1.2.7. Каналы взаимодействия подсистем в системах СМСМИАЗ и ЗАИМ	53
1.3. Основные результаты	53
Литература к главе 1	54
Глава 2. Основные физические процессы в области воздействия мощным радиоизлучением	65
2.1. Экскурс в историю. Этапы исследований	65
2.2. Средства воздействия	69
2.3. Средства диагностики	70
2.3.1. Радар частичных отражений	70
2.3.2. Радар доплеровского зондирования	74
2.3.3. Цифровой ионозонд	75
2.3.4. Программно-аппаратная система многочастотного зондирования	76
2.3.5. Многоцелевой комплекс УВЧ-зондирования	82
2.3.6. Система приема сигналов навигационных ИСЗ	82
2.3.7. Магнитометр-флюксметр	82
2.3.8. Радар некогерентного рассеяния	84

2.4. Механизмы воздействия мощным радиоизлучением.	
Исходные уравнения	85
2.4.1. Тепловой (нагревный) механизм	85
2.4.2. Стрикционный механизм	86
2.4.3. Ионизационный механизм	87
2.4.4. Релятивистский механизм	88
2.4.5. Сравнение механизмов	88
2.4.6. Уравнения баланса энергии и концентрации частиц	89
2.4.7. Возмущение концентрации электронов	90
2.4.8. Реализация механизмов воздействия мощным радиоизлучением в условиях геокосмической плазмы	92
2.5. Физические процессы в D- и E-областях ионосферы	92
2.5.1. Нагрев электронов	92
2.5.2. Активизация процесса прилипания электронов	109
2.5.3. Подавление процесса рекомбинации электронов	116
2.5.4. Пробой атмосферы	125
2.5.5. Возмущение неоднородной структуры нижней ионосферы	130
2.5.6. Кроссмодуляция радиоволн	142
2.5.7. Самомодуляция радиоволн	147
2.5.8. Самовоздействие радиоволн	148
2.5.9. Взаимодействие радиоволн	160
2.5.10. Нелинейное искажение поляризации радиоволн	161
2.5.11. Нелинейное смещение частоты радиоволн	169
2.5.12. Генерация сигналов комбинационных частот (эффект Гетманцева)	173
2.5.13. Дефокусировка радиоволн	177
2.6. Физические процессы в F-области ионосферы	178
2.6.1. Неустойчивости. Структуризация плазмы	178
2.6.2. Гигантское ракурсное рассеяние радиоволн	182
2.6.3. Искусственное радиоизлучение ионосферы	182
2.6.4. Эффект магнитного зенита	183
2.6.5. Искусственное свечение ионосферы	191
2.6.6. Многократный гирорезонанс	192
2.6.7. Резонансное рассеяние радиоволн	193
2.6.8. Фокусировка и дефокусировка радиоволн	195
2.6.9. Геомагнитный эффект	198
2.6.10. Особенности эффектов при воздействии X-поляризованной радиоволной	200
2.6.11. Возмущение температуры и концентрации электронов	201
2.7. Воздействие мощным радиоизлучением на внешнюю ионосферу и магнитосферу	205
2.7.1. Воздействие ОНЧ-радиоизлучением	205
2.7.2. Воздействие ВЧ-радиоизлучением	208

2.8. Основные результаты	212
Литература к главе 2	214
Глава 3. Проявление крупномасштабных возмущений в геокосмосе в области воздействия мощным радиоизлучением	229
3.1. Физические процессы в D-области ионосферы	229
3.2. Физические процессы в E-области ионосферы	232
3.3. Физические процессы в F-области ионосферы	234
3.4. Основные результаты	235
Литература к главе 3	236
Глава 4. Крупномасштабные возмущения в геокосмосе	238
4.1. Физические процессы в D-области ионосферы	239
4.1.1. Результаты экспериментов с нагревным стендом «Сура»	239
4.1.2. Результаты экспериментов с нагревным стендом «Москва»	245
4.1.3. Результаты экспериментов с нагревным стендом «Тромсё»	247
4.1.4. Когерентные структуры	249
4.1.5. Волновые возмущения	249
4.2. Физические процессы в E-области ионосферы	262
4.2.1. Результаты комплексных экспериментов	262
4.2.2. Результаты вертикального зондирования ионосферы	264
4.2.3. Результаты доплеровского зондирования ионосферы	301
4.2.4. Результаты наблюдений методом некогерентного рассеяния	305
4.2.5. Результаты магнитометрических наблюдений	314
4.3. Физические процессы в F-области ионосферы	334
4.3.1. Генерация колебаний инфразвукового диапазона	334
4.3.2. Вариации спектра ионосферных волновых возмущений	348
4.3.3. Квазипериодические вариации доплеровского смещения частоты	360
4.3.4. Особенности волновых возмущений с частотами, близкими к собственным частотам атмосферы	396
4.3.5. Зондирование волновых возмущений методом некогерентного рассеяния	418
4.3.6. Согласованные вариации доплеровского смещения частоты ракурсно-рассеянных радиоволн и уровня геомагнитного поля	466
4.4. Физические процессы во внешней ионосфере и магнитосфере	495
4.4.1. Результаты спутниковых наблюдений	495
4.4.2. Результаты расчетов	497
4.5. Глобальные возмущения	501

4.5.1. Результаты оценок	501
4.5.2. Результаты наблюдений	503
4.6. Механизмы крупномасштабных возмущений	504
4.6.1. Стимулированные возмущения в нижней ионосфере	504
4.6.2. Механизмы генерации волновых возмущений	506
4.6.3. Механизмы генерации колебаний инфразвукового диапазона	509
4.7. Взаимодействие подсистем в системе ЗАИМ	524
4.8. Основные результаты	528
Литература к главе 4	529
Заключение	540