



МИНИСТЕРСТВО  
ОБРАЗОВАНИЯ  
И НАУКИ

ХАРЬКОВСКИЙ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ  
имени В. Н. КАРАЗИНА



НАЦИОНАЛЬНАЯ  
АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ,  
МИНИСТЕРСТВО  
ОБРАЗОВАНИЯ  
И НАУКИ

ИНСТИТУТ ИОНОСФЕРЫ

Л. Ф. ЧЕРНОГОР  
И. Ф. ДОМНИН

# ФИЗИКА ГЕОКОСМИЧЕСКИХ БУРЬ

ХАРЬКОВ  
2014

УДК 550.385.4:523.98  
ББК 26.2  
Ч-49

**Рецензенты:**

чл.-корр. НАН Украины **Ю. М. Ямпольский** (Радиоастрономический институт НАН Украины, г. Харьков);  
доктор физ.-мат. наук, профессор **О. К. Черемных** (Институт космических исследований НАНУ и ГКАУ, г. Киев).

*Утверждено к печати решением Ученого совета  
Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина  
(протокол № 10 от 28 октября 2013 г.)*

- Чорногор Л. Ф., Домнін І. Ф.**  
Ч-49 Фізика геокоsmічних бур : монографія / Л. Ф. Чорногор, І. Ф. Домнін. – Х. : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2014. – 408 с.  
**ISBN 978-966-285-028-4**  
Викладено загальні відомості про системи: Сонце – міжпланетне середовище – магнітосфера – атмосфера – Земля – біосфера та Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера. Оцінено енергетику основних процесів в цих системах. Детально описано результати спостережень і моделювання основних фізичних ефектів, що супроводжували геокоsmічні бурі в 1998–2011 рр.  
Для наукових працівників, аспірантів і студентів фізичних спеціальностей університетів.  
169 іл., 46 табл., 584 бібл. **УДК 550.385.4:523.98**  
**ББК 26.2**
- Черногор Л. Ф., Домнин И. Ф.**  
Ч-49 Фізика геокоsmічних бурь : монографія / Л. Ф. Черногор, И. Ф. Домнин. – Х. : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2014. – 408 с.  
**ISBN 978-966-285-028-4**  
Изложены общие сведения о системах: Солнце – межпланетная среда – магнитосфера – атмосфера – Земля – биосфера и Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера. Оценена энергетика основных процессов в этих системах. Детально описаны результаты наблюдений и моделирования основных физических эффектов, сопровождавших геокоsmіческие бури в 1998–2011 гг.  
Для научных работников, аспирантов и студентов физических специальностей университетов.  
169 илл., 46 табл., 584 библ. **УДК 550.385.4:523.98**  
**ББК 26.2**
- Chernogor L. F., Domnin I. F.**  
Ч-49 Physics of Geomagnetic Storms : monograph / L. F. Chernogor, I. F. Domnin. – Kharkiv, V. N. Karazin Kharkiv National University, 2014. – 408 p.  
**ISBN 978-966-285-028-4**  
General information on the: Sun – interplanetary environment – magnetosphere – atmosphere – Earth – biosphere system and the Earth – atmosphere – ionosphere – magnetosphere system is presented. The energetics of main processes in these systems is estimated. The observation and simulation results of main physical effects which had accompanied geomagnetic storms on 1998–2011 years are described in detail.  
This book is a reference for scientists. It also serves as a textbook for postgraduate and graduate students taking courses in physics at university level.  
169 Figures, 46 Tables, 584 References. **УДК 550.385.4:523.98**  
**ББК 26.2**

**ISBN 978-966-285-028-4**

© Харьковський національний університет  
імені В. Н. Каразіна, 2014  
© Інститут іоносфери, 2014  
© Черногор Л. Ф., Домнин И. Ф. 2014  
© Макет обложки, Дончик И. Н., 2014



## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Предисловие</b>	8
<b>Список основных сокращений</b>	10
<b>Список основных обозначений</b>	12
<b>Введение</b>	16
Литература к введению	21
<b>Глава 1. Основы системной парадигмы</b>	25
1.1. Общие сведения	25
1.2. Основные положения системной парадигмы	26
1.3. Строение систем. Основные процессы	29
1.3.1. Процессы в системе СМСМИАЗ	29
1.3.2. Процессы в системе ЗАИМ	30
1.3.3. Процессы в системе СМСМИАЗБ	31
1.4. Свойства систем	33
1.5. Энергетика процессов	34
1.5.1. Энергетика солнечных процессов	39
1.5.2. Энергетика солнечных и геокосмических бурь	39
1.5.3. Энергетика магнитосферы	41
1.5.4. Энергетика ионосферы	42
1.5.5. Энергетика атмосферы	45
1.5.6. Энергетика геоэлектрического поля	47
1.6. Потоки энергии	48
1.7. Основные эффекты геокосмических бурь	49
1.7.1. Сведения о бурях	49
1.7.2. Эффекты солнечных вспышек в нижней ионосфере	54
1.7.3. Вариации концентрации электронов в нижней ионосфере	67
1.7.4. Эффекты солнечных вспышек в верхней ионосфере	80
1.7.5. Эффекты выбросов корональной массы	95
1.7.6. Геомагнитный эффект солнечной вспышки	101
1.8. Взаимодействие подсистем в системе СМСМИАЗ	101
1.9. Основные результаты	104
Литература к главе 1	106
<b>Глава 2. Эффекты геокосмической бури 25 сентября 1998 г.</b>	114

2.1. Общие сведения	114	3.5.3. Подвод энергии к электронному газу	186
2.2. Средства и методы наблюдения	115	3.5.4. Потоки тепла, переносимого электронами	187
2.2.1. Радар некогерентного рассеяния	115	3.6. Обсуждение	188
2.2.2. Ионозонд	115	3.6.1. Положительная фаза ионосферной бури	188
2.2.3. Методики измерений и обработки данных	115	3.6.2. Отрицательная фаза ионосферной бури	189
2.3. Состояние космической погоды	118	3.6.3. Процессы, сопровождавшие смену фаз ионосферной бури	189
2.4. Результаты наблюдений	120	3.7. Основные результаты	191
2.4.1. Вариации концентрации электронов	120	Литература к главе 3	193
2.4.2. Вариации температуры электронов и ионов	123	<b>Глава 4. Эффекты геокосмической бури 29–31 мая 2003 г.</b>	196
2.4.3. Вариации вертикальной составляющей скорости переноса плазмы	125	4.1. Общие сведения	196
2.4.4. Вариации ионного состава	128	4.2. Средства и методы наблюдения	196
2.4.5. Волновые возмущения	128	4.3. Состояние космической погоды	196
2.5. Результаты расчетов и моделирования	131	4.4. Результаты наблюдений	202
2.5.1. Температура нейтралов	131	4.4.1. Вариации геомагнитного поля	202
2.5.2. Концентрация нейтральных составляющих	133	4.4.2. Вариации концентрации электронов	202
2.5.3. Концентрация электронов и высота максимума слоя F2	134	4.4.3. Вариации высоты максимума слоя F2	205
2.5.4. Температуры электронов и ионов	136	4.4.4. Вариации температуры электронов и ионов	205
2.5.5. Меридиональная составляющая скорости нейтрального ветра	138	4.4.5. Вариации вертикальной составляющей скорости переноса плазмы	207
2.5.6. Диффузионная скорость переноса ионов	141	4.4.6. Вариации ионного состава	209
2.5.7. Ионосферно-плазмозферное взаимодействие	141	4.4.7. Волновые возмущения	210
2.5.8. Подвод энергии к электронному газу	144	4.5. Результаты расчетов и моделирования	212
2.5.9. Потоки тепла, переносимого электронами	145	4.5.1. Концентрация нейтралов	212
2.5.10. Нагрев атмосферы	146	4.5.2. Температура нейтралов	213
2.5.11. Волновые возмущения	148	4.5.3. Подвод энергии к электронам	215
2.6. Обсуждение	151	4.5.4. Потоки тепла, переносимого электронами	216
2.6.1. Процессы, стимулированные геокосмической бурей	151	4.5.5. Потоки плазмы	218
2.6.2. Физическое истолкование результатов наблюдений	153	4.6. Обсуждение	218
2.6.3. Соответствие результатов наблюдений и моделирования	162	4.6.1. Основные проявления и особенности геокосмической бури	218
2.7. Основные результаты	165	4.6.2. Физическое истолкование результатов наблюдений	220
Литература к главе 2	167	4.7. Основные результаты	225
<b>Глава 3. Эффекты геокосмической бури 20–23 марта 2003 г.</b>	173	Литература к главе 4	227
3.1. Общие сведения	173	<b>Глава 5. Эффекты геокосмической бури 7–10 ноября 2004 г.</b>	230
3.2. Средства и методы наблюдения	174	5.1. Общие сведения	230
3.3. Состояние космической погоды	174	5.2. Средства и методы наблюдения	231
3.4. Результаты наблюдений	176	5.2.1. Радар частичных отражений	231
3.4.1. Вариации концентрации электронов	176	5.2.2. Радар некогерентного рассеяния	231
3.4.2. Вариации температуры электронов и ионов	179	5.2.3. Ионозонд «Базис»	232
3.4.3. Вариации вертикальной составляющей скорости переноса плазмы	181	5.2.4. Магнитометр-флюксметр	232
3.4.4. Волновые возмущения	182	5.3. Процессы в системе Солнце – межпланетная среда – геокосмос	232
3.5. Результаты расчетов и моделирования	182	5.3.1. Процессы на Солнце	232
3.5.1. Температура нейтралов	182	5.3.2. Состояние космической погоды	233
3.5.2. Концентрация нейтральных составляющих	186	5.4. Процессы в нижней ионосфере	239
		5.4.1. Вариации концентрации электронов	239
		5.4.2. Волновые возмущения	241

5.5. Процессы в средней и внешней ионосфере	253	7.4. Вариации вертикальной составляющей скорости переноса плазмы	330
5.5.1. Вариации концентрации электронов	253	7.4.5. Волновые возмущения	332
5.5.2. Эффект когерентного эха	259	7.5. Результаты расчетов и моделирования	336
5.5.3. Вариации температуры электронов и ионов	259	7.5.1. Подвод энергии к электронам	336
5.5.4. Вариации полного электронного содержания	561	7.5.2. Концентрация нейтралов	337
5.5.5. Вариации ионного состава	262	7.5.3. Температура нейтралов	338
5.5.6. Волновые возмущения	264	7.6. Обсуждение	339
5.6. Обсуждение	277	7.7. Основные результаты	344
5.6.1. Процессы в нижней ионосфере	277	Литература к главе 7	345
5.6.2. Процессы в средней и внешней ионосфере	280	<b>Глава 8. Эффекты геокосмической бури 5–6 августа 2011 г.</b>	348
5.7. Основные результаты	287	8.1. Общие сведения	348
Литература к главе 5	290	8.2. Средства и методы наблюдения	349
<b>Глава 6. Эффекты геокосмической бури 4–6 апреля 2006 г.</b>	295	8.3. Состояние космической погоды	349
6.1. Общие сведения	295	8.4. Результаты наблюдений	351
6.2. Средства и методы наблюдения	296	8.4.1. Вариации критической частоты слоя F2	351
6.2.1. Радар некогерентного рассеяния	296	8.4.2. Вариации высоты максимума слоя F2	353
6.2.2. Ионозонд «Базис»	296	8.4.3. Вариации концентрации электронов	354
6.2.3. Методики измерений и обработки данных	296	8.4.4. Вариации температуры электронов и ионов	354
6.3. Состояние космической погоды	297	8.4.5. Вариации вертикальной составляющей скорости переноса плазмы	357
6.4. Результаты наблюдений	297	8.4.6. Волновые возмущения	359
6.4.1. Первая положительная фаза ИБ	299	8.5. Результаты расчетов и моделирования	365
6.4.2. Отрицательная фаза ИБ	299	8.5.1. Подвод энергии к электронам	365
6.4.3. Вторая положительная фаза ИБ	300	8.5.2. Концентрация нейтралов	366
6.4.4. Вариации концентрации электронов	300	8.5.3. Температура нейтралов	367
6.4.5. Вариации температуры электронов и ионов	301	8.5.4. Потоки тепла, переносимого электронами	369
6.4.6. Волновые возмущения	302	8.5.5. Потоки плазмы	369
6.5. Результаты расчетов и моделирования	312	8.6. Обсуждение	369
6.5.1. Концентрация нейтралов	312	8.7. Основные результаты	373
6.5.2. Температура нейтралов	314	Литература к главе 8	374
6.5.3. Подвод энергии к электронам	315	<b>Глава 9. Классификация геомагнитных бурь</b>	376
6.5.4. Потоки тепла, переносимого электронами	316	9.1. Общие сведения	376
6.6. Обсуждение	317	9.2. Классификация геомагнитных возмущений (геомагнитных бурь)	377
6.6.1. Положительные фазы бури	317	9.3. Классификация ионосферных возмущений (ионосферных бурь)	378
6.6.2. Отрицательная фаза бури	318	9.3.1. Основные закономерности	380
6.6.3. Волновые возмущения	318	9.3.2. Основные схемы развития бури	384
6.7. Основные результаты	319	9.3.3. Классификация бурь и ионосферный индекс	387
Литература к главе 6	320	9.4. Статистика магнитных бурь	389
<b>Глава 7. Эффекты геокосмической бури 20 января 2010 г.</b>	323	9.5. Статистика ионосферных бурь	391
7.1. Общие сведения	323	9.6. Классификация геокосмических бурь	392
7.2. Средства и методы наблюдения	324	9.7. Основные результаты	393
7.3. Состояние космической погоды	324	Литература к главе 9	394
7.4. Результаты наблюдений	326	<b>Заключение</b>	399
7.4.1. Вариации критической частоты	326	Сведения об авторах	400
7.4.2. Вариации концентрации электронов	327		
7.4.3. Вариации температуры электронов и ионов	329		