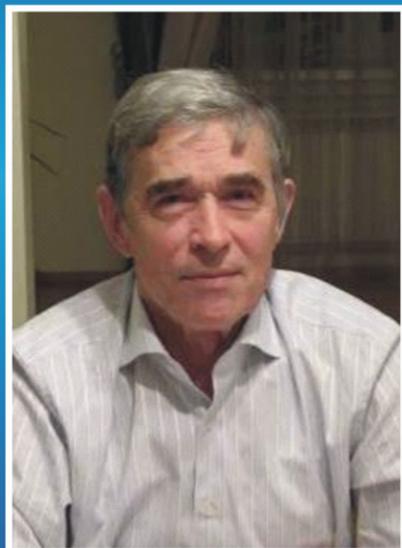




Бондур Валерий Григорьевич, академик Российской академии наук, доктор технических наук, профессор, директор Научно-исследовательского института аэрокосмического мониторинга «Аэрокосмос». Известный ученый в области разработки физических основ дистанционного зондирования Земли, аэрокосмического мониторинга окружающей среды. Автор более 550 научных работ. Научный руководитель многих российских и международных программ и проектов по экологическому мониторингу, предупреждению и снижению последствий природных и техногенных катастроф. Дважды лауреат премий Правительства России в области науки и техники.



Крапивин Владимир Федорович, действительный член Российской академии естественных наук, доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, действительный член Болгарской академии по науке, новой культуре и устойчивому развитию, заведующий отделом информатики Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, автор трех и соавтор 27 монографий и более 400 статей в области дистанционного зондирования, эоинформатики, теории игр, принятия статистических решений и глобального моделирования.



**В.Г. Бондур**  
**В.Ф. Крапивин**

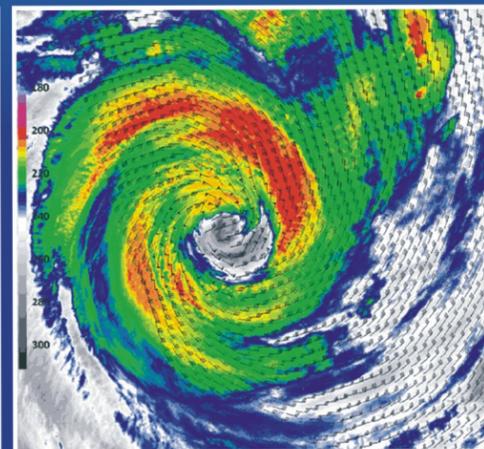
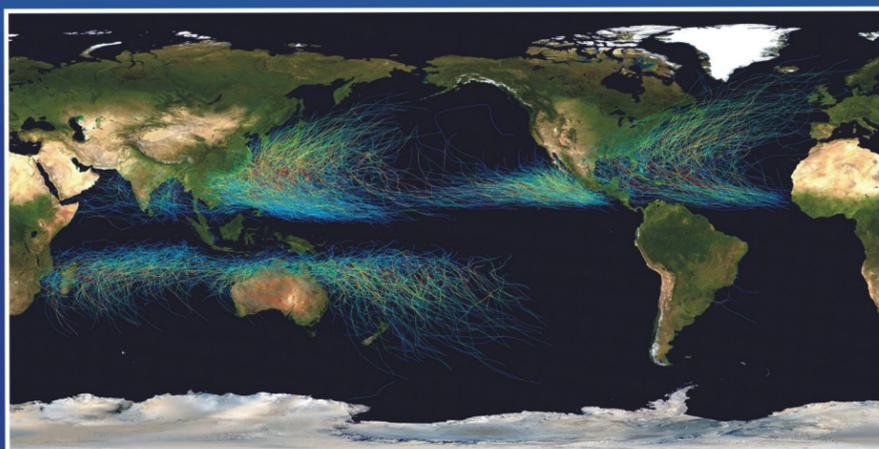
# КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ

Космический мониторинг  
тропических циклонов

В.Г. Бондур  
В.Ф. Крапивин



Научный мир



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА «АЭРОКОСМОС»

---

THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE RUSSIAN FEDERATION  
THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

FEDERAL STATE BUDGETARY RESEARCH INSTITUTION  
AEROCOSMOS RESEARCH INSTITUTE FOR AEROSPACE MONITORING

THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE RUSSIAN FEDERATION  
THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

FEDERAL STATE BUDGETARY RESEARCH INSTITUTION  
**AEROCOSMOS RESEARCH INSTITUTE FOR AEROSPACE MONITORING**

*Valery G. BONDUR, Vladimir F. KRAPIVIN*

**SPACE MONITORING  
OF TROPICAL CYCLONES**

Moscow  
Scientific World  
2014

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО  
МОНИТОРИНГА «АЭРОКОСМОС»

*В.Г. БОНДУР, В.Ф. КРАПИВИН*

# **КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ**

Москва  
Научный мир  
2014

УДК 504.05/06.056/058

ББК 26.0

Б81

Рецензенты:

Д-р физ.-мат. наук, профессор *Ф.А. Мкртчян*

Д-р техн. наук, профессор *Ю.Ю. Громов*

**Бондур В.Г., Крапивин В.Ф.**

КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ.– М.: Научный мир, 2014.–508 с.,78 с. илл.

ISBN 978-5-91522-356-0

Рассматриваются возможности современных методов и систем космического мониторинга таких катастрофических природных явлений, как тропические циклоны. При анализе причин возникновения этих опасных процессов в системе океан–атмосфера физические механизмы их формирования рассматриваются как интерактивные природно-антропогенные взаимодействия, управление которыми возможно при решении задачи оценки уровня неустойчивости системы. Для оперативной диагностики зарождения и развития тропических циклонов предлагаются различные методы и подходы, основанные на получении и анализе данных дистанционного и наземного мониторинга, а также математического моделирования. Рассмотрены технологии формирования баз данных тропического циклогенеза, алгоритмы обработки информации, а также методы исследования различных процессов, происходящих в тропических циклонах, с использованием космических и других данных. Анализируются конкретные ситуации возникновения тропических циклонов, социально-экономические аспекты последствий от них и рассматриваются пути борьбы с этими кризисными ситуациями в системе океан–атмосфера. Книга продолжает развитие подходов, предложенных ранее авторами, к изучению динамики глобальной системы природа–общество. Основным смыслом этого подхода является совместное использование технологий космического мониторинга и математического моделирования при интеграции получаемой информации в созданную междисциплинарную систему знаний, так или иначе определяющих функционирование системы природа–общество.

Книга предназначена для специалистов в области аэрокосмических исследований Земли, мониторинга окружающей среды, предупреждения и снижения последствий чрезвычайных ситуаций, изучения изменений климата, исследования взаимоотношений человеческого общества и природы, геополитики, и методологии междисциплинарных исследований. Она будет полезна студентам старших курсов, аспирантам и докторантам, специализирующимся в данных областях знаний. Особый интерес она может представлять для разработчиков систем космического мониторинга, пользователей данными дистанционного зондирования, разработчиков и пользователей информационных технологий мониторинга в сфере предупреждения населения о катастрофических природных явлениях.



Публикуется при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту №13-05-07013, не подлежит продаже.

**Valery G. Bondur, Vladimir F. Krapivin**

SPACE MONITORING OF TROPICAL CYCLONES. – Moscow: Scientific World, 2014. – 508 p., 78 p. ill.

Capabilities of state-of-the-art methods and systems for satellite monitoring of such disastrous natural phenomena as tropical cyclones have been considered. Analyzing the origins of such dangerous processes in the ocean-atmosphere system, the authors consider physical mechanisms of their forming as interactive nature-anthropogenic feedbacks which can be controlled under the condition of solving the task of system instability assessment. Different approaches and methods based on remote and ground-based monitoring data collection and analysis as well as mathematical modeling have been proposed for online diagnostics of tropical cyclone genesis and evolution. Technologies for the creation of tropical cyclogenesis databases, data processing algorithms, as well as the methods to study various processes in tropical cyclones using satellite and other data have been considered. Specific situations of tropical cyclone genesis, socio-economical aspects of their consequences have been analyzed and ways to overcome such crisis environmental situations have been discussed. Integrally, the book keeps on developing the approaches earlier proposed by the authors to study global nature-society system dynamics. Basic meaning of this approach is in the combined use of satellite monitoring and mathematical modeling technologies under the integration of the obtained information to the created interdisciplinary system of knowledge that somehow define the nature-society system functioning.

This book is intended for specialists in the fields of the Earth aerospace study, environmental monitoring, prevention and mitigation of disasters, climate change study, mankind and nature interaction study, geopolitics, and methodologies of interdisciplinary research. The book will be useful for undergraduate and postgraduate students studying these fields of science. This book will be of particular interest to satellite monitoring system developers and remote sensing data users, developers and users of monitoring information technologies for warning people about disastrous natural processes and phenomena.

ISBN 978-5-91522-356-0

© Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., 2014

© Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
Научно-исследовательский институт  
аэрокосмического мониторинга «Аэрокосмос», 2014

© Научный мир, 2014

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений .....	5
Введение .....	13
<i>Глава 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ФИЗИКА ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ</i> .....	18
1.1. Общие сведения о тропических циклонах, категории и стадии их развития .....	18
1.1.1. Общие сведения о тропических циклонах .....	18
1.1.2. Первые результаты исследований тропических циклонов из космоса .....	24
1.1.3. Стадии развития и шкалы для классификации тропических циклонов .....	27
1.1.4. Некоторые физические характеристики тропических циклонов .....	32
1.1.5. Присвоение имен тропическим циклонам .....	33
1.2. Структура, условия и физические механизмы зарождения тропических циклонов .....	35
1.2.1. Структура и энергетические особенности тропических циклонов .....	35
1.2.2. Условия зарождения тропических циклонов .....	39
1.2.3. Природа и физические механизмы зарождения и развития тропических циклонов .....	42
1.2.4. Анализ термической гипотезы зарождения тропических циклонов .....	47
1.3. Теории и модели образования и развития тропических циклонов .....	48
1.3.1. Общая характеристика существующих теорий и моделей .....	48
1.3.2. Модели фазовой неустойчивости .....	51
1.3.3. Модель потенциального вихря .....	53
1.3.4. Моделирование спиральной турбулентности .....	54
1.3.5. Имитация крупномасштабных уровней турбулентного перемешивания .....	56
1.3.6. Пример трехмерной модели зарождения тропического циклона .....	57
1.3.7. Модели, используемые для прогнозирования тропических циклонов .....	61
1.3.8. Простая модель оценки параметров тропического циклона при его эволюции .....	62
1.4. Статистика тропических циклонов .....	66
1.5. Радиотепловое поле Земли в контексте исследования системы океан–атмосфера .....	72
1.6. Тропический циклон как динамическая категория явлений окружающей среды .....	78

---

<i>Глава 2. ТРОПИЧЕСКИЕ ЦИКЛОНЫ КАК ИНТЕРАКТИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ГЛОБАЛЬНОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ</i> .....	85
2.1. Глобальный климат и тропический циклогенез .....	85
2.1.1. Исследования глобального климата .....	85
2.1.2. Анализ данных наблюдений за климатом .....	92
2.1.3. Климатообразующие факторы .....	100
2.1.4. Фундаментальность проблемы изменения глобального климата .....	111
2.2. Состояние и перспективы изучения глобального круговорота углерода .....	115
2.3. Взаимосвязь между тропическими циклонами и климатическими трендами .....	124
<i>Глава 3. КОСМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА МОНИТОРИНГА ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ</i> .....	127
3.1. Актуальность применения космических методов для мониторинга зон тропического циклогенеза.....	127
3.2. Обзор низкоорбитальных средств космического мониторинга тропических циклонов .....	129
3.2.1. Российские метеорологические спутниковые системы .....	129
3.2.2. Метеорологическая спутниковая система NOAA и ее развитие .....	136
3.2.3. Космическая система наблюдения Земли EOS .....	141
3.2.4. Спутники серии DMSP .....	148
3.2.5. Перспективная космическая система JPSS (NPOESS) .....	151
3.2.6. Другие космические средства .....	152
3.3. Геостационарные метеорологические спутниковые системы .....	157
3.4. Системный подход к космическому мониторингу тропических циклонов .....	161
3.4.1. Общие положения .....	161
3.4.2. Особенности использования методов дистанционного зондирования для мониторинга тропических циклонов .....	163
3.4.3. Значимые параметры тропических циклонов и способы их регистрации из космоса .....	165
3.4.4. Аппаратура дистанционного зондирования для мониторинга тропических циклонов .....	167
3.4.5. Особенности использования данных, поступающих с аппаратуры ДЗЗ ....	169
3.5. Методика сбора и обработки космической информации для исследования тропических циклонов .....	172
3.5.1. Подходы к выбору метода исследования .....	172
3.5.2. Особенность сбора и обработки космической информации для исследования тропических циклонов .....	174
<i>Глава 4. ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗ КОСМОСА РАЗЛИЧНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЗОНАХ ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОГЕНЕЗА</i> .....	179
4.1. Космический мониторинг полей температуры в зонах тропического циклогенеза .....	179

4.1.1. Температурные факторы и их роль в формировании тропических циклонов .....	179
4.1.2. Результаты исследований из космоса полей температуры в районах активного циклогенеза .....	183
4.2. Анализ энергетических особенностей тропических циклонов на основе космических данных .....	193
4.2.1. Постановка задачи и используемые космические данные .....	193
4.2.2. Первичная обработка космических данных .....	195
4.2.3. Распознавание образов тропических циклонов .....	196
4.2.4. Оценка энергии тропических циклонов по космическим данным .....	197
4.3. Исследование воздействия крупномасштабных атмосферных вихревых процессов на ионосферу Земли .....	203
4.3.1. Актуальность изучения воздействия тропических циклонов на ионосферу и методы проведения исследований .....	203
4.3.2. Исследование электризации урагана и проникновения электрического поля в ионосферу .....	205
4.3.3. Регистрация ионосферных неоднородностей над ураганом «Катрина» .....	207
4.4. Исследование воздействия вариаций потоков космических лучей на тропические циклоны .....	213
4.4.1. Физические особенности воздействия потоков частиц на тропические циклоны .....	213
4.4.2. Исследование воздействий космических лучей на ураган «Катрина» .....	216
4.4.3. Анализ полученных результатов .....	218
4.4.4. Тепловые эффекты в тропических циклонах при ионизации космическими лучами .....	221
<i>Глава 5. ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ГЛОБАЛЬНОГО ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОГЕНЕЗА</i> .....	223
5.1. Подходы к обнаружению моментов зарождения тропических циклонов .....	223
5.1.1. Актуальность выявления информативных признаков-индикаторов зарождения тропических циклонов .....	223
5.1.2. Индикаторы-предвестники зарождения тропических циклонов .....	225
5.2. Поиск индикаторов-предвестников тропических циклонов на основе анализа фазового состояния системы океан–атмосфера .....	228
5.2.1. Необходимость комплексного анализа закономерностей функционирования системы океан–атмосфера .....	228
5.2.2. Модель фазовой неустойчивости системы океан–атмосфера .....	230
5.2.3. Методы принятия решений для оценки состояния системы океан–атмосфера .....	231
5.2.4. Особенности применения процедуры принятия решений при анализе фазовых переходов в системе океан–атмосфера .....	234
5.2.5. Индикатор неустойчивости системы океан–атмосфера – признак зарождения тропических циклонов .....	236

---

5.3. Принципы организации мониторинга зон зарождения тропических циклонов ...	240
5.3.1. Структура системы мониторинга и процедуры поиска и обнаружения зон зарождения тропических циклонов .....	240
5.3.2. Формирование системы принятия решений об обнаружении тропических циклонов на основе данных наблюдений .....	244
5.3.3. Последовательная процедура принятия решений, основанная на расчете параметров распределения Вальда .....	250
5.4. Диагностика системы океан–атмосфера с использованием процедуры перколяции .....	253
5.4.1. Особенности применения теории перколяции для обнаружения тропических циклонов .....	253
5.4.2. Данные мониторинга, используемые для построения перколяционных кластеров .....	254
5.4.3. Расчет индикатора неустойчивости системы океан–атмосфера .....	255
5.4.4. Построение и анализ перколяционных кластеров для различных ситуаций .....	258
5.5. Анализ динамики состояния системы океан–атмосфера .....	265
5.5.1. Преодоление нестационарности .....	265
5.5.2. Исследование динамики индикатора неустойчивости системы океан–атмосфера .....	267
5.6. Пятнистость как индикатор состояния поверхности океана .....	272
5.7. Расчет функции радиояркого отклика системы океан–атмосфера на вариации тепловых потоков .....	274
<i>Глава 6. ГЛОБАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОГЕНЕЗА     И ОЦЕНКА РИСКОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ .....</i>	<i>277</i>
6.1. Предсказание путей движения и интенсивности тропических циклонов .....	277
6.1.1. Подходы к решению задач предсказания путей движения и интенсивности тропических циклонов .....	277
6.1.2. Моделирование путей движения тропических циклонов и оценка их интенсивности .....	278
6.2. Моделирование поведения системы океан–атмосфера на различных стадиях зарождения тропических циклонов .....	280
6.2.1. Роль Мирового океана в круговороте энергии и вещества .....	280
6.2.2. Роль взаимодействия атмосферы и океана в круговороте CO <sub>2</sub> .....	283
6.2.3. Зональная модель глобального круговорота углерода в системе океан–атмосфера .....	293
6.3. Моделирование круговорота углерода в Мировом океане .....	296
6.4. Органический углерод и океанские экосистемы .....	299
6.4.1. Модели океанских экосистем .....	299
6.4.2. Уравнения динамики экосистем Мирового океана .....	302
6.4.3. Вертикальная структура океана .....	306
6.4.4. Модель экосистемы апвеллинга .....	308

6.5. Моделирование процессов в магнитосфере как элемента тропического циклогенеза .....	312
6.6. Оценка риска и принятие статистических решений в задачах тропического циклогенеза .....	318
6.6.1. Алгоритмы оценки риска и принятия решений .....	318
6.6.2. Согласование экспертной и эмпирической информации .....	326
6.6.3. Показатели эффективности управления риском от природных катастроф .....	329
6.6.4. Социальное и человеческое измерение риска .....	335
6.6.5. Прогнозируемые риски глобальных изменений с учетом тропического циклогенеза .....	336
<i>Глава 7. СОВРЕМЕННЫЕ БАЗЫ ДАННЫХ ПО ТРОПИЧЕСКИМ ЦИКЛОНАМ</i> .....	349
7.1. Архивы данных глобального тропического циклогенеза .....	349
7.1.1. Принципы формирования баз данных глобального циклогенеза .....	349
7.1.2. Сведения о некоторых архивах данных по тропическим циклонам .....	351
7.1.3. Российские базы данных по тропическим циклонам .....	352
7.2. Принципы создания базы данных по тропическим циклонам на основе космической информации .....	359
7.2.1. Общие требования и подходы к созданию базы данных .....	359
7.2.2. Проектирование структуры базы данных .....	361
7.2.3. Сбор и систематизация исходной космической информации о тропических циклонах для формирования баз данных .....	367
7.2.4. Построение траекторий тропических циклонов .....	375
7.2.5. Визуализация информации о тропических циклонах, собранной в базе данных .....	376
7.3. Примеры проведения исследований тропического циклогенеза с использованием созданной базы космических данных .....	381
7.3.1. Выбор объекта и района исследований .....	381
7.3.2. Выбор типов данных дистанционного зондирования .....	386
7.3.3. Предварительная обработка космических данных и ее результаты .....	387
7.3.4. Методика и результаты исследований тропических циклонов с использованием базы космических данных .....	390
7.3.5. Сопоставление космических данных о температуре поверхности океана с показаниями буйковых и метеорологических станций .....	392
7.4. Атлас среднеклиматических данных в системе океан–атмосфера .....	397
7.5. Алгоритмы реконструкции пространственных распределений характеристик системы океан–атмосфера на основе баз данных .....	399
7.5.1. Алгоритм восстановления данных мониторинга методом дифференциальной аппроксимации .....	399
7.5.2. Применение метода гармонических функций для восстановления данных микроволновой радиометрии в замкнутой области .....	402

---

7.5.3. Приближенный метод решения обратной задачи при идентификации геофизических параметров .....	404
7.5.4. Алгоритм рандомизированной линейно-ломаной аппроксимации .....	407
7.5.5. Метод квазилинеаризации для приближенного решения уравнений имитационной системы .....	408
7.5.6. Метод эволюционного моделирования .....	412
7.5.7. Подходы к выбору метода интерполяции .....	414
7.5.8. Реализация технологии эволюционной информатики .....	415
<i>Глава 8. СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОСЛЕДСТВИЙ ОТ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ И ПОДХОДЫ К БОРЬБЕ С НИМИ</i> .....	424
8.1. Общие положения .....	424
8.2. Воздействия тропических циклонов на окружающую среду и среду обитания человека .....	425
8.3. Воздействие тропических ураганов на экономический потенциал регионов различных стран .....	431
8.4. Национальные и глобальные подходы и программы по сокращению риска потерь от тропических циклонов .....	438
8.5. Экспертная система для изучения глобальных изменений и прогноза рисков потерь от тропических циклонов .....	439
8.5.1. Роль информационных ресурсов для оценки изменений в окружающей среде .....	439
8.5.2. Модели, используемые для оценки состояния и изменений в окружающей среде .....	440
8.5.3. Подходы к построению глобальной системы природа–общество .....	443
8.5.4. Синтез глобальной модели системы природа–общество .....	446
8.5.5. Использование глобальной модели СПО для оценки рисков потерь от тропических циклонов .....	450
8.6. Глобальный анализ последствий от тропических циклонов .....	452
8.7. Поиск методов защиты от тропических циклонов .....	457
8.7.1. Подходы к борьбе с тропическими циклонами .....	457
8.7.2. Некоторые эксперименты по уничтожению тропических ураганов .....	460
8.7.3. Некоторые гипотезы и сценарии борьбы с тропическими циклонами .....	463
Литература .....	468



Научное издание

**Бондур Валерий Григорьевич  
Крапивин Владимир Федорович**

**КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ  
ТОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ**

ООО «Издательство «Научный мир»  
127055, Москва, Тихвинский пер., д. 10/12, корп. 4, офис 91  
Тел. +7(499) 973-25-13, +7(499) 973-26-70  
E-mail: [naumir@naumir.ru](mailto:naumir@naumir.ru)  
Internet: <http://www.naumir.ru>

Подписано к печати 23.10.2013  
Формат 60×84/8  
Гарнитура Times New Roman. Печать офсетная. Печ. л. 63,5  
Заказ 701

Издание отпечатано в типографии  
ООО «Галлея-Принт»  
111024, Москва, ул. 5-я Кабельная, 2-б