

УДК 532.5:551.46
ББК 22.236.35+26.221
Д 449



Издание осуществлено при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований по
проекту №05-05-78042.

Дийкстра Х.

Нелинейная физическая океанография. — М.—Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2007. — 680 с.

Эта книга является учебным и научным изданием по использованию методологии теории динамических систем для изучения физики глобальной океанской циркуляции, как, например, динамики отделения Гольфстрима и явления Эль-Ниньо—Южное колебание. В книге описываются численные методы анализа бифуркационных диаграмм для динамических систем большой размерности, применение которых основано на дискретизации океанических моделей. Систематический анализ иерархии моделей, проводимый с помощью описанных методик, дает новое понимание явлений климатической изменчивости. В книге обсуждается связь между различными моделями внутри иерархии. Физика явлений описывается с механистической точки зрения и, где возможно, она соотносится с результатами современных моделей и наблюдений. Каждая глава самодостаточна и содержит много деталей вывода уравнений. Во втором издании были сделаны дополнения во всех разделах книги. В конце каждой главы содержатся упражнения, что позволяет использовать книгу в учебном процессе.

ISBN 978-5-93972-629-0

ББК 22.236.35+26.221

© Перевод на русский язык:
НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2007

Translation from the English language edition:
Nonlinear Physical Oceanography, 2nd ed. By Henk A. Dijkstra
Copyright © 2005 Springer Science+Business Media
All Rights Reserved

<http://shop.rcd.ru>
<http://ics.org.ru>

Оглавление

Предисловие редактора перевода	13
Предисловие к русскому изданию	17
Предисловие	19
Благодарности	23
ГЛАВА 1. Введение	25
1.1. Изменчивость климата в прошлом	26
1.1.1. Последние 2.5 миллиона лет	28
1.1.2. Поздний Дриас	30
1.1.3. Малый ледниковый период	33
1.1.4. Причины изменчивости климата в прошлом	34
1.1.4.1. Внешнее воздействие: орбитальная и сол- нечная изменчивость	35
1.1.4.2. Внутренняя изменчивость	38
1.2. Современная циркуляция океана	39
1.2.1. Поверхностное воздействие	40
1.2.2. Типы циркуляции океана	41
1.2.3. Перенос тепла и влаги	45
1.2.4. Циркуляция океана и изменчивость климата в прошлом	46
1.3. Современная изменчивость климата	49
1.3.1. ENSO	49
1.3.2. Атлантическое мультдесятилетнее колебание	52
1.4. Физика изменчивости климата	55
1.4.1. Системный взгляд	56
1.4.2. Основные вопросы	57
1.4.3. Подход	58
1.5. Упражнения к главе 1	60

ГЛАВА 2. Предварительные сведения	69
2.1. Основные уравнения	70
2.1.1. Бескоординатная запись	70
2.1.2. Сферические координаты	72
2.1.3. Диссипативные процессы	75
2.1.4. Граничные условия	77
2.1.5. Интегральные условия	78
2.2. Перенос завихренности	81
2.2.1. Наклон и растяжение вихревых трубок	84
2.2.2. Бароклинное производство завихренности	84
2.3. Потенциальная завихренность (ПЗ)	85
2.3.1. Теорема Эртеля	86
2.3.2. Сохранение ПЗ	88
2.4. Устойчивость	89
2.5. Упражнения к главе 2	92
ГЛАВА 3. Точка зрения динамических систем	99
3.1. Одна элементарная задача	100
3.1.1. Модель Стоммела с двумя боксами	100
3.1.2. Равновесные решения	105
3.1.3. Устойчивость равновесных решений	106
3.1.4. Присутствие симметрии	109
3.1.5. Несовершенства	112
3.2. Динамические системы: неподвижные точки	113
3.2.1. Элементарные понятия	115
3.2.2. Бифуркации коразмерности 1	120
3.2.2.1. Единственное нулевое собственное значение	121
3.2.2.2. Единственная пара комплексно-сопряженных собственных значений	125
3.2.3. Теория несовершенства	126
3.2.4. Бифуркации коразмерности 2	130
3.2.4.1. Бифуркация типа точка возврата	131
3.2.4.2. Бифуркация Богданова–Тakensа	131
3.3. Периодические решения и их устойчивость	132
3.3.1. Сечения Пуанкаре и отображения Пуанкаре	133
3.3.2. Теория Флоке	136
3.4. Бифуркации периодических орбит	140
3.4.1. Бифуркация циклической складки	140
3.4.2. Бифуркация удвоения периода	140

3.4.3.	Бифуркация Наймарка—Сакера	142
3.5.	Глобальные бифуркации	144
3.5.1.	Гомоклинические орбиты	145
3.5.2.	Динамическая система Лоренца (Lorenz, 1963)	146
3.6.	Явление резонанса: синхронизация колебаний	149
3.7.	Физика бифуркационного поведения	152
3.7.1.	Физические ограничения	153
3.7.2.	Качественная чувствительность и количественная чув- ствительность	154
3.7.3.	Механизмы неустойчивости	156
3.7.3.1.	Бифуркация типа седло-узел	157
3.7.3.2.	Закритическая бифуркация и вилка	158
3.7.3.3.	Бифуркация Хопфа	160
3.8.	Упражнения к главе 3	160
ГЛАВА 4.	Численные методы	167
4.1.	Задача-прототип	171
4.1.1.	Введение	171
4.1.2.	Модель	173
4.1.3.	Стационарное решение	174
4.1.4.	Безразмерные уравнения	175
4.2.	Вычисление стационарных решений	176
4.2.1.	Дискретизация	176
4.2.2.	Продолжение при помощи псевдодлины дуги	180
4.2.3.	Метод Эйлера—Ньютона	183
4.3.	Определение точек разветвления и переходы	185
4.3.1.	Обнаружение бифуркаций	186
4.3.2.	Переход с ветви на ветвь	187
4.3.3.	Поиск изолированных ветвей	190
4.4.	Задача линейной устойчивости	192
4.4.1.	Метод совместных итераций	194
4.4.2.	QZ-метод Якоби—Дэвидсона	197
4.5.	Неявное интегрирование по времени	201
4.6.	Решение систем линейных уравнений. Прямые методы	202
4.6.1.	Основной принцип	203
4.6.2.	Выбор ведущего элемента	205
4.7.	Решение систем линейных уравнений. Итерационные методы	206
4.7.1.	Методы релаксации	206
4.7.2.	Проекционные методы	208

4.7.2.1.	Метод GMRES	210
4.7.2.2.	Метод BICGSTAB	211
4.8.	Приложение к задаче-прототипу	215
4.9.	Упражнения к главе 4	220
ГЛАВА 5.	Ветровая циркуляция океана	227
5.1.	Явления	229
5.1.1.	Гольфстрим	229
5.1.2.	Куросио	233
5.1.3.	Основные вопросы	234
5.2.	Модели океанской циркуляции на средних широтах	236
5.2.1.	Однородная модель	236
5.2.2.	Преобладающие равновесия	238
5.2.3.	Многослойная модель	241
5.3.	Модель мелкой воды и квазигеострофическая модель	243
5.3.1.	Сферическая модель мелкой воды	243
5.3.2.	Модель β -плоскости	245
5.3.3.	Квазигеострофические модели на β -плоскости	248
5.3.4.	Обзор моделей SW и QG-моделей	251
5.4.	Классические результаты	253
5.4.1.	Теория Свердруп—Манка—Стоммела	254
5.4.2.	Временная изменчивость	259
5.4.2.1.	Волны Россби	259
5.4.2.2.	Волны Россби в ограниченном бассейне	261
5.4.2.3.	Основные механизмы неустойчивости	262
5.5.	Режимы QG-течений с двумя круговоротами	270
5.5.1.	Эквивалентные баротропные потоки	270
5.5.1.1.	Основные бифуркационные диаграммы	271
5.5.1.2.	Переходные течения	280
5.5.2.	Бароклинные течения	287
5.5.2.1.	Основные бифуркационные диаграммы	287
5.5.2.2.	Переходные течения	290
5.6.	Режимы потоков с двумя круговоротами в моделях SW	298
5.6.1.	Эквивалентная баротропная модель	298
5.6.2.	Соединение модели SW с QG-моделью	303
5.6.3.	Бароклинная модель	306
5.7.	Континентальная геометрия	311
5.7.1.	Континенты в рамках модели SW на β -плоскости	311
5.7.2.	Континенты на сфере	314

5.7.2.1.	Североатлантический бассейн	314
5.7.2.2.	Северная область Тихого океана	318
5.7.3.	Обобщение	319
5.8.	Океанические модели с высоким разрешением	323
5.8.1.	Типичные результаты	324
5.8.2.	Анализ результатов ПКМО	327
5.8.2.1.	Гольфстрим	329
5.8.2.2.	Курисио	331
5.9.	Обобщение	332
5.9.1.	Выводы	333
5.9.2.	Концепции интерпретации	335
5.9.2.1.	Множественные средние траектории?	335
5.9.2.2.	Моды изменчивости?	338
5.10.	Упражнения к главе 5	340
ГЛАВА 6.	Термохалинная циркуляция	349
6.1.	Климатическая изменчивость северной Атлантики	350
6.1.1.	Наблюдения	350
6.1.2.	Основные вопросы и подход к их решению	354
6.2.	Потенциальные механизмы	356
6.2.1.	Что движет ТХЦ ?	357
6.2.2.	Адвективная обратная связь	358
6.2.3.	Конвективная обратная связь	359
6.2.4.	Качельные колебания	363
6.2.5.	Петлеобразное колебание	366
6.2.6.	Модели ТХЦ	367
6.3.	Двухмерные модели Буссинеска	369
6.3.1.	Формулировка	370
6.3.2.	Безразмерные уравнения	371
6.4.	Диффузионные термохалинные потоки	373
6.4.1.	Основная бифуркационная диаграмма	373
6.4.2.	Физические механизмы	376
6.4.2.1.	Нарушение симметрии	376
6.4.2.2.	Переход к временной зависимости	380
6.4.3.	Сравнение моделей	383
6.5.	Конвективные термохалинные потоки	390
6.5.1.	Основные бифуркационные диаграммы	392
6.5.2.	Неидеальности	395
6.5.2.1.	Связанная модель	397

6.5.2.2.	Несимметричное взаимодействие атмосферы и океана	399
6.5.2.3.	Режимная диаграмма	402
6.6.	Зонально-усредненные модели	405
6.6.1.	Масштабирование уравнений	405
6.6.2.	Зональное усреднение	408
6.6.2.1.	Алгоритм	409
6.6.2.2.	Конвективная корректировка	413
6.6.3.	Бифуркационные диаграммы	414
6.7.	Трехмерные модели	418
6.7.1.	Конфигурация SH: термические потоки	418
6.7.1.1.	Мультидесятилетняя мода	419
6.7.1.2.	Потоки конечной амплитуды	424
6.7.2.	Конфигурация SH: термохалинные потоки	430
6.7.2.1.	Множественные равновесия и новые внутренние моды	430
6.7.2.2.	Потоки конечной амплитуды	434
6.7.3.	Конфигурация DH: термохалинные потоки	439
6.7.3.1.	Бифуркационные диаграммы	439
6.7.3.2.	Потоки конечной амплитуды	442
6.7.4.	Мультибассейные и глобальные модели	445
6.7.4.1.	Бифуркационные диаграммы	445
6.7.4.2.	Потоки конечной амплитуды	449
6.8.	Связанные модели океана и атмосферы	455
6.9.	Обобщение	463
6.9.1.	Разные средние термохалинные потоки?	463
6.9.2.	Временная изменчивость за счет инерционных мод?	467
6.10.	Упражнения к главе 6	471
ГЛАВА 7.	Динамика и физика ENSO	479
7.1.	Основные явления	481
7.1.1.	Среднегодовое состояние	481
7.1.2.	Сезонный цикл	483
7.1.3.	Межгодовая изменчивость	485
7.1.4.	Низкочастотная изменчивость ENSO	490
7.1.5.	Основные вопросы и подход к их решению	490
7.2.	Модели экваториального океана	492
7.2.1.	Модель океана постоянной плотности	492
7.2.2.	Модель с редуцированной гравитацией	493

7.2.3.	Экваториальные волны	494
7.2.4.	Отклик на внешнее воздействие в бассейне	501
7.3.	Физика взаимодействия	508
7.3.1.	Влияние диабатического нагрева на атмосферу	508
7.3.2.	Процессы регулирования в океане	513
7.3.3.	Процессы, определяющие SST	517
7.3.4.	Обратная связь	521
7.3.4.1.	Обратная связь от термоклина	521
7.3.4.2.	Обратная связь от апвеллинга	523
7.3.4.3.	Обратная связь от зональной адвекции	524
7.3.4.4.	Интенсивность обратной связи	524
7.4.	Модель Зебиака—Кейна	525
7.4.1.	Формулировка	525
7.4.2.	Результаты	528
7.5.	К теории осциллятора с запаздыванием	532
7.5.1.	Связанные моды: периодический бассейн океана	532
7.5.2.	Связанные моды: ограниченный бассейн	538
7.5.2.1.	Поведение системы вблизи экватора	539
7.5.2.2.	Предел быстрых волн	545
7.5.2.3.	Предел слабой связи	550
7.5.3.	Моды в полноценной модели	552
7.5.4.	Концептуальные модели ENSO	556
7.5.4.1.	Двухполосная модель	558
7.5.4.2.	Осциллятор с запаздыванием	562
7.5.4.3.	Осциллятор связанных волн	565
7.5.4.4.	Осциллятор повторного действия	565
7.6.	Связанные процессы и среднегодовое состояние	568
7.6.1.	Смоделированное и связанное средние состояния	568
7.6.2.	Нарушение множественного равновесия	569
7.6.3.	Размещение языка холодной воды	574
7.7.	Обобщенное среднее состояние и изменчивость	579
7.7.1.	Состояние области теплой воды/языка холодной воды	580
7.7.2.	Мода ENSO	581
7.7.3.	Редукция модели	586
7.8.	Существование сезонного цикла	589
7.8.1.	Связанные процессы и сезонный цикл	589
7.8.2.	Взаимодействие сезонного цикла и ENSO	591
7.8.3.	Нерегулярность ENSO	597
7.9.	ENSO в моделях общей циркуляции	598
7.10.	Обобщение	604

12 ОГЛАВЛЕНИЕ

7.10.1. Общие результаты МПС	606
7.10.2. Многомасштабная физика	609
7.10.3. Будущее ENSO	615
7.11. Упражнения к главе 7	617
Литература	623
Предметный указатель	659