

К. Моханакумар

Взаимодействие стратосферы и тропосферы

Перевод с английского
к. ф.-м. н. Р.Ю. Лукьяновой
Под редакцией
д. г. н. проф. Г.В. Алексева



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2011

K. Mohanakumar

Stratosphere Troposphere Interactions

An Introduction

 Springer

УДК 551.51
ББК 26.2
М 86

Моханакумар К. **Взаимодействие стратосферы и тропосферы** / Пер. с англ. Р.Ю. Лукьяновой; Под ред. Г.В. Алексеева. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. — 452 с. — ISBN 978-5-9221-1348-9.

В книге описываются физические, радиационные, динамические и химические явления, участвующие в процессах стратосферно-тропосферного взаимодействия. Рассматриваются такие проблемы, как Антарктическая озоновая дыра, глобальное потепление и сопутствующее ему охлаждение стратосферы, стратосферно-тропосферный обмен, процессы переноса в верхней тропосфере, роль стратосферы в формировании тропосферных погодных систем.

Книга предназначена исследователям, занимающимся физикой и химией атмосферы, метеорологией, аэрономией и другими науками, связанными с изучением окружающей среды, а также студентам и аспирантам соответствующих специальностей.

Научное издание

МОХАНАКУМАР Кесавалиллар

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СТРАТОСФЕРЫ И ТРОПОСФЕРЫ

Редактор *В.С. Аролович*

Оригинал-макет: *Д.П. Вакуленко*

Оформление переплета: *В.Ф. Киселёв*

Подписано в печать 19.08.11. Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 28,25. Уч.-изд. л. 31,2. Тираж 100 экз. Заказ №К-6673.

Издательская фирма «Физико-математическая литература»

МАИК «Наука/Интерпериодика»

117997, Москва, ул. Профсоюзная, 90

E-mail: fizmat@maik.ru, fmlsale@maik.ru;

<http://www.fml.ru>

Отпечатано с электронных носителей издательства

в ГУП «ИПК «Чувашия», 428019

г. Чебоксары, пр-т И.Яковлева, 13

ISBN 978-5-9221-1348-9



9 785922 113489

ISBN 978-5-9221-1348-9 (русск.)

ISBN 978-1-4020-8216-0 (англ.)

© Springer Science + Business Media B.V., 2008

© ФИЗМАТЛИТ, 2011

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	13
Пособности	16
Предисловие автора к русскому изданию	18
Предисловие научного редактора перевода	19
Глава 1. Структура и состав нижней и средней атмосферы	21
1. Эволюция земной атмосферы	21
1.1.1. Живая Земля (23).	
2. Земная атмосфера и ее состав	23
1.2.1. Формирование гомосферы и гетеросферы (25).	
3. Атмосферное давление	26
1.3.1. Вертикальная структура давления и плотности (26).	
4. Термическая структура атмосферы	28
1.4.1. Тропосфера (28). 1.4.2. Стратосфера (30). 1.4.3. Мезосфера (31). 1.4.4. Термосфера (31). 1.4.5. Экзосфера (32).	
5. Структура верхней атмосферы	32
1.5.1. Ионосфера (32). 1.5.2. Плазмосфера (34). 1.5.3. Магнитосфера (34).	
6. Тропопауза	35
1.6.1. Тропическая тропопауза (37). 1.6.2. Аббревиатуры для тропопаузы (38). 1.6.3. Динамическая тропопауза (39). 1.6.4. Озоновая тропопауза (40). 1.6.5. Складки тропопаузы (40). 1.6.6. Значение тропопаузы для тропосферных погодных явлений (41).	
7. Климатология нижней и средней атмосферы.	42
1.7.1. Температура (42). 1.7.2. Ветер (44). 1.7.3. Суточный цикл (46). 1.7.4. Годовая осцилляция (46). 1.7.5. Полугодовая осцилляция (47). 1.7.6. Межгодовые и внутрисезонные колебания (49). 1.7.7. Струйные течения (49). 1.7.8. Квазидвухлетняя осцилляция (КДО) (50). 1.7.9. Средние меридиональные ветры (51). 1.7.10. Зонально осредненная циркуляция воздушных масс (53). 1.7.11. Полярный вихрь (55).	
8. Другие значительные явления стратосферно-тропосферного взаимодействия	57

1.8.1. Полярные стратосферные облака (57).	1.8.2. Внезапное стратосферное потепление (58).	1.8.3. Арктическая осцилляция (60).	1.8.4. Северо-Атлантическая осцилляция (60).	
1.9. Атмосферные приливы				61
1.10. Основные парниковые газы в тропосфере и стратосфере				62
1.10.1. Стратосферный озон (62).	1.10.2. Углекислый газ (64).			
1.10.3. Водяной пар (65).	1.10.4. Водяной пар в стратосфере (67).			
1.11. Верхняя тропосфера и нижняя стратосфера				68
1.12. Атмосферные аэрозоли				71
1.12.1. Водорастворимые аэрозоли (71).	1.12.2. Время жизни аэрозолей (72).	1.12.3. Тропосферные аэрозоли (72).	1.12.4. Стратосферные аэрозоли (73).	
Вопросы и задачи				73
Список литературы				75
Глава 2. Радиационные процессы в нижней и средней атмосфере				78
2.1. Введение				78
2.2. Базовые понятия излучения				78
2.2.1. Электромагнитная энергия (79).	2.2.2. Энергия излучения (82).	2.2.3. Фотометрия и радиометрия (82).	2.2.4. Излучение абсолютно черного тела (83).	2.2.5. Рассеяние в атмосфере (87).
2.2.6. Поглощение и эмиссия (88).	2.2.7. Отражательная способность и прозрачность (89).	2.2.8. Радиационная температура (91).	2.2.9. Солнечная постоянная (91).	2.2.10. Альбеда (92).
2.2.11. Парниковый эффект (93).				
2.3. Перенос излучения				94
2.3.1. Закон Бэра (95).	2.3.2. Уравнение Шварцшильда (96).			
2.3.3. Поглощения солнечной радиации и нагрев атмосферы (97).	2.3.4. Пересчет запасенной энергии в показатели нагрева (99).			
2.3.5. Инфракрасные нагрев и охлаждение (101).	2.3.6. Радиационный нагрев, связанный с поглощением (102).	2.3.7. Вертикальные профили радиационного нагрева (102).		
2.4. Солнечная радиация и атмосфера Земли				103
2.4.1. Поглощение солнечной радиации (103).	2.4.2. Атмосферное окно (107).	2.4.3. Ослабление солнечной радиации в стратосфере и тропосфере (109).		
2.5. Атмосфера и радиационные процессы в ней				111
2.5.1. Радиационные процессы в тропосфере (112).	2.5.2. Радиационные процессы в стратосфере (113).			
2.6. Стратосферное охлаждение				114
2.6.1. Причины стратосферного охлаждения (115).	2.6.2. Показатели стратосферного охлаждения (116).	2.6.3. Влияние других факторов (116).		
2.7. Эффекты солнечной активности в стратосфере и тропосфере				119
Вопросы и задачи				123
Список литературы				125

Глава 3. Динамика тропосферы и стратосферы	128
3.1. Введение	128
3.2. Основные характеристики атмосферной динамики	128
3.2.1. Уравнение состояния (129). 3.2.2. Гидростатическое уравнение (129). 3.2.3. Геопотенциальная высота (130). 3.2.4. Гипсометрическое уравнение (131).	
3.3. Фундаментальные законы сохранения	132
3.3.1. Уравнение движения (сохранения импульса) (132).	
3.3.2. Уравнение непрерывности (сохранения массы) (134).	
3.3.3. Сохранение энергии (137).	
3.4. Термодинамика сухой атмосферы	139
3.4.1. Потенциальная температура (139). 3.4.2. Устойчивость атмосферы (141). 3.4.3. Частота Бранта-Вяйсяля (141). 3.4.4. Уравнение термодинамической энергии (143).	
3.5. Прimitивные уравнения	144
3.5.1. Формы примитивных уравнений (144). 3.5.2. Уравнение горизонтального движения (145).	
3.6. Равновесный ветровой поток	145
3.6.1. Геоострофический ветер (146). 3.6.2. Агеострофический ветер (146). 3.6.3. Градиентный ветер (147). 3.6.4. Соотношение между геоострофическим и градиентным ветрами (149). 3.6.5. Термический ветер (149). 3.6.6. Применимость термического ветра (150). 3.6.7. Баротропная и бароклинная атмосферы (151).	
3.7. Циркуляция, завихренность и дивергенция	152
3.7.1. Циркуляция (152). 3.7.2. Завихренность (153). 3.7.3. Относительная завихренность (153). 3.7.4. Завихренность в естественной системе координат (t, n, z) (153). 3.7.5. Планетарная завихренность (154). 3.7.6. Абсолютная завихренность (155). 3.7.7. Дивергенция (155).	
3.8. Сохраняющиеся свойства	155
3.8.1. Потенциальная завихренность (155). 3.8.2. Потенциальная завихренность Эртеля (156).	
3.9. Уравнение завихренности	158
3.9.1. Уравнение завихренности в координатах x, y, p (158).	
3.9.2. Упрощенное уравнение завихренности (159). 3.9.3. Уравнение квазигеострофической завихренности (159). 3.9.4. Уравнение квазигеострофической потенциальной завихренности (160).	
3.10. Меридиональная циркуляция в средней атмосфере	161
3.10.1. Зонально осредненная циркуляция (161).	
3.11. Среднегодовая энергетика	167
Вопросы и задачи	168
Список литературы	171
Глава 4. Волны в тропосфере и стратосфере	173
4.1. Введение	173
4.2. Что такое волна?	173

4.3. Основные свойства волн	174
4.4. Классификация волн	176
4.5. Волны в атмосфере	177
4.5.1. Акустические (звуковые) волны (179). 4.5.2. Волны Лэмба (180). 4.5.3. Мелководные гравитационные волны (181). 4.5.4. Волны Россби (188).	
4.6. Атмосферные гравитационные волны	194
4.6.1. Чисто внутренние гравитационные волны (196). 4.6.2. Инерционно-гравитационные волны (200). 4.6.3. Опрокидывание волн (205).	
4.7. Воздействие планетарных волн	206
4.8. Экваториальные волны	208
4.8.1. Волны Кельвина (208). 4.8.2. Смешанные гравитационные волны Россби (212).	
4.9. Вертикально распространяющиеся атмосферные волны	216
4.9.1. Вертикально распространяющиеся волны Кельвина (217). 4.9.2. Вертикально распространяющиеся гравитационные волны Россби (218).	
4.10. Энергетика вертикально распространяющихся волн	219
4.10.1. Приближение Элиассена–Палма (219). 4.10.2. Теория Чарни–Дрезина (223). 4.10.3. Теория Линдзена (225).	
4.11. Механизм квазидвухлетней осцилляции	226
4.11.1. Связь между Солнцем и КДО (227). 4.11.2. Воздействие планетарных волн (227). 4.11.3. Ограничения теории планетарных волн (228).	
4.12. Внезапное стратосферное потепление	229
4.12.1. Эволюция потепления (229). 4.12.2. Теория стратосферного потепления (229).	
Вопросы и задачи	231
Список литературы	232
Глава 5. Химические процессы в стратосфере и тропосфере	235
5.1. Введение	235
5.2. Сечение поглощения	236
5.3. Химическая кинетика	236
5.3.1. Реакции первого порядка (236). 5.3.2. Реакции второго порядка (237). 5.3.3. Трехкомпонентные реакции (237).	
5.4. Термические реакции расщепления	238
5.5. Уравнение непрерывности	239
5.6. Фотохимия озона	239
5.7. Ограничения чепменовского цикла	242
5.8. Реагенты и коэффициенты скорости реакции	243
5.9. Фотоллиз озона	244

5.9.1. Высотная зависимость (245).	5.9.2. Широтная зависимость (245).	5.9.3. Сезонная зависимость (245).	5.9.4. Суточная зависимость (245).
5.10. Гетерогенные реакции	245		
5.10.1. Разрушение озона в реакции ClO-ClO (248).	5.10.2. Активация/деактивация хлора и азота (250).		
5.11. Каталитические потери	250		
5.11.1. Каталитические потери водорода (251).	5.11.2. Реакции фотодиссоциации метана (252).	5.11.3. Каталитический цикл NO _x (254).	5.11.4. Каталитический цикл NO _x (255).
5.11.5. Температурная зависимость каталитических реакций NO _x (257).	5.11.6. Источники хлора (259).	5.11.7. Каталитические реакции хлора (260).	5.11.8. Каталитические реакции Cl ₂ и антарктическая озоновая дыра (262).
5.11.9. Источники брома (263).	5.11.10. Каталитические реакции Br _x (264).		
5.12. Стратосферные частицы	265		
5.12.1. Сульфатные аэрозоли (265).	5.12.2. Химический состав ПСО (266).		
5.13. Химия тропосферы	266		
5.13.1. Источники химических компонентов в тропосфере (267).	5.13.2. Тропосферный озон (267).	5.13.3. Тропосферный метан (269).	
5.14. Химия атмосферы и климат	269		
5.15. Нобелевская премия по химии атмосферы	275		
Вопросы и задачи	277		
Список литературы	278		
Глава 6. Истощение стратосферного озона и антарктическая озоновая дыра	281		
6.1. Введение	281		
6.2. Факторы, влияющие на изменчивость стратосферного озона	282		
6.2.1. Химические аспекты (283).	6.2.2. Динамические процессы (284).	6.2.3. Стратосферные температуры (286).	6.2.4. Атмосферный перенос (286).
6.2.5. Солнечный цикл (287).	6.2.6. Извержения вулканов (288).	6.2.7. Аэрозольный эффект (289).	6.2.8. Пироконвекция (290).
6.2.9. Экспорт из вихря (291).			
6.3. Причины процесса истощения озона	291		
6.3.1. Особенности полярной метеорологии (291).	6.3.2. Химические процессы, приводящие к истощению полярного озона (292).	6.3.3. Образование радикалов хлора (292).	
6.4. Антропогенный вклад в истощение озона	292		
6.4.1. Соединения хлора (295).	6.4.2. Хлорфторуглероды в стратосфере (295).		
6.5. Антарктическая озоновая дыра	296		
6.5.1. Открытие антарктической озоновой дыры (299).	6.5.2. Теория озоновой дыры (302).	6.5.3. Динамическая теория (302).	

6.5.4. Теория окислов азота (303).	6.5.5. Теория гетерогенной химии (303).	
6.6. Антарктический полярный вихрь		304
6.6.1. Циркуляция в полярном вихре (304).	6.6.2. Струя полярной ночи и полярный вихрь (306).	6.6.3. Температура (307).
6.6.4. Низкие температуры в период южной полярной зимы (307).	6.6.5. Потенциальная завихренность (309).	6.6.6. Нагревание (309).
6.6.7. Перенос (311).	6.6.8. Вертикальные движения и перенос озона (311).	6.6.9. Химия полярного вихря (312).
6.7. Структура и динамика антарктической озоновой дыры		312
6.7.1. Горизонтальная структура (312).	6.7.2. Вертикальная структура озона (314).	6.7.3. Вертикальные профили, полученные с помощью озонзондов (315).
6.8. Значение контура 220 Дб		316
6.9. Степень истощения озона		317
6.9.1. Площадь озоновой дыры (317).	6.9.2. Минимум озона (318).	6.9.3. Дефицит массы озона (319).
6.10. Годовой цикл антарктического озона		319
6.11. Аномальная антарктическая озоновая дыра 2002 года		320
6.11.1. Большое стратосферное потепление в Южном полушарии (321).		
6.12. Арктическая озоновая дыра		323
6.13. Монреальский протокол		325
6.13.1. Поправки и дополнения (325).	6.13.2. Перспективы Монреальского протокола (326).	
6.14. Современное состояние истощения озона		327
6.15. Озоновый слой в будущем		329
6.15.1. Стадии восстановления глобального озона (330).	6.15.2. Естественные факторы (330).	
Вопросы и задачи		332
Список литературы		333
Глава 7. Процессы переноса в стратосфере и тропосфере		336
7.1. Введение		336
7.2. Циркуляция Брюера–Добсона		336
7.2.1. Низкое содержание озона в тропической стратосфере (338).	7.2.2. Циркуляция в тропиках (339).	7.2.3. Перенос озона (339).
7.2.4. Циркуляция во внетропической области (341).	7.2.5. Перенос ХФУ (341).	7.2.6. Существование циркуляции Брюера–Добсона (342).
7.2.7. Циркуляция Брюера–Добсона и радиационный баланс (343).	7.2.8. Межполушарные различия в циркуляции Брюера–Добсона (344).	
7.3. Атмосферные волны и перенос трасеров		345
7.3.1. Движение (347).	7.3.2. Нарастание и диссипация волн (347).	7.3.3. Волновой перенос (349).
7.3.4. Волновое перемешивание (349).	7.3.5. Влияние волн на среднюю циркуляцию (349).	

7.4. Другие факторы	349
7.5. Квазидвухлетняя осцилляция и циркуляция Брюера-Добсона	350
7.5.1. Циркуляция КДО (350). 7.5.2. Перенос озона: влияние КДО (352).	
7.6. Меридиональная циркуляция в тропосфере	353
7.7. Страто-мезосферная средняя меридиональная циркуляция	354
7.8. Возраст воздуха в стратосфере.	355
Вопросы и задачи	357
Список литературы	358
Глава 8. Стратосферно-тропосферный обмен	360
8.1. Введение	360
8.2. Перенос через тропосферу.	363
8.3. Циркуляция Брюера-Добсона и стратосферно-тропосферный обмен	366
8.3.1. Тропический апвеллинг (366). 8.3.2. Изменения в слое тропической тропопаузы (367). 8.3.3. Обмен через тропический переходный слой (369). 8.3.4. Изменения в слое экстратропической тропопаузы (370).	
8.4. Процессы обмена в районе тропопаузы средних широт и субтропиков.	370
8.4.1. Блокирующие антициклоны (области высокого давления) (371). 8.4.2. Отсеченные системы низкого давления (371). 8.4.3. Складки тропопаузы (372).	
8.5. Процессы обмена в районе тропической тропопаузы.	373
8.5.1. Вымораживание/высушивание (374). 8.5.2. Эффект атмосферного рекодера (375). 8.5.3. Стратосферный фонтан (377). 8.5.4. Диабатическая циркуляция (378). 8.5.5. Тепловой баланс тропической тропопаузы (378).	
8.6. Стратосферный дренаж.	379
8.7. Глобальные динамические аспекты обмена: экстратропическая накачка.	380
8.8. Уравнения для циркуляции, возбуждаемой волнами.	381
Вопросы и задачи	384
Список литературы	385
Глава 9. Влияние стратосферы на тропосферную погоду и климат	388
9.1. Введение	388
9.2. Радиационное воздействие на стратосферно-тропосферное взаимодействие.	389
9.3. Волновое взаимодействие	390
9.3.1. Планетарные волны (392). 9.3.2. Гравитационные волны (393).	
9.4. Роль КДО в процессах взаимодействия	394

9.4.1. Эффекты КДО в стратосфере и мезосфере (396).	9.4.2. Эффекты КДО в тропосфере (396).	9.4.3. Стратосферная КДО и тропосферная двухлетняя осцилляция (397).
9.5. Внезапное стратосферное потепление и его проявление в СТВ . . .	398	
9.5.1. Стратосферное потепление и воздействие на тропосферу (398).		
9.6. Стратосферный полярный вихрь и тропосферная погода	399	
9.7. Стратосферно-тропосферное взаимодействие и распространение в нижние слои	400	
9.7.1. Воздействие Арктической осцилляции на климат (401).		
9.7.2. Кольцевые моды (405).		
9.8. Антропогенное влияние	408	
9.9. Воздействие изменений озона на приповерхностный климат	410	
9.10. Влияние стратосферы на свою собственную изменчивость	413	
9.11. Влияние муссонов на стратосферно-тропосферное соединение	414	
9.11.1. КДО в стратосфере и муссоны (415).		
9.12. Тропическая конвекция и влияние водяного пара	419	
9.13. Состав тропосферы	421	
9.14. Расширение тропического пояса	422	
9.15. Воздействие солнечной активности на стратосферно-тропосферное соединение	424	
9.16. Стратосферные аэрозоли вулканического происхождения	427	
9.17. Сценарии будущего	429	
Вопросы и задачи	430	
Список литературы	431	
Список сокращений	438	
Список символов	441	
Физические константы	445	
Ответы на избранные вопросы и задачи	446	
К главе 1	446	
К главе 2	446	
К главе 3	446	
К главе 4	447	
К главе 5	447	
Предметный указатель	448	