

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ
ИНФРАЗВУКОВЫХ ВОЛН
В АНИЗОТРОПНОЙ
ФЛУКТУИРУЮЩЕЙ
АТМОСФЕРЕ**

И.П. Чунчuzов, С.Н. Куличков



ИНСТИТУТ ФИЗИКИ АТМОСФЕРЫ ИМ. А.М. ОБУХОВА
Российской академии наук

И.П. Чунчuzов, С.Н. Куличков

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ
ИНФРАЗВУКОВЫХ ВОЛН
В АНИЗОТРОПНОЙ ФЛУКТУИРУЮЩЕЙ
АТМОСФЕРЕ**

Москва
ГЕОС
2020

УДК 551.796:534.2,534-6

ББК 26.323

Ч 26

Ч 26 **Чунчузов И.П., Куличков С.Н.** Распространение инфразвуковых волн в анизотропной флуктуирующей атмосфере. – М.: ГЕОС, 2020. 260 с.

ISBN 978-5-89118-817-4

В монографии излагается теория распространения инфразвуковых волн (частоты ниже 20 Гц) в реальной атмосфере с присущими ей мезомасштабными флуктуациями скорости ветра и температуры с периодами от 1 мин до нескольких часов. С помощью теории объясняются наблюдаемые в экспериментах эффекты, которые оказывают мезомасштабные флуктуации на параметры инфразвуковых волн, распространяющихся в разных слоях атмосферы: атмосферном пограничном слое, стратосфере, мезосфере и нижней термосфере.

Дается последовательное изложение теоретических и экспериментальных результатов исследования статистических свойств мезомасштабных флуктуаций скорости ветра и температуры, вызванных внутренними гравитационными волнами и вихревыми структурами в атмосфере, а также эффектов, которые оказывают эти флуктуации на дальнейшее распространение инфразвуковых волн в атмосфере.

Книга может быть полезна для специалистов в области акустики и оптики атмосферы, дистанционного зондирования атмосферы, динамики внутренних волн, нелинейной акустики, инфразвукового мониторинга взрывов и атмосферных штормовых явлений.

*Издание осуществлено при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований
по проектам № 20-15-00004, 18-55-05002 Арм_а и 18-05-00576.*



Издание РФФИ не подлежит продаже

УДК 551.796:534.2,534-6

ББК 26.323

© Чунчузов И.П., Куличков С.Н., 2020

© ГЕОС, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|------------|
| Введение | 3 |
| Глава 1. Распространение низкочастотных звуковых волн в стратифицированной движущейся атмосфере: теория и наблюдения | 6 |
| 1.1. Уравнения акустики неоднородной движущейся среды | 8 |
| 1.2. Поле точечного гармонического источника звука в атмосфере, стратифицированной по температуре и скорости ветра | 15 |
| 1.3. Экспериментальное исследование поля низкочастотного гармонического источника звука в приземном слое атмосферы | 46 |
| 1.4. Сравнение эксперимента по распространению звука от гармонического источника с теорией | 51 |
| Литература | 60 |
| Глава 2. Поле точечного импульсного источника звука в стратифицированном движущемся слое атмосферы | 64 |
| 2.1. Поле акустического импульса в широком приземном волноводе | 67 |
| 2.2. Экспериментальное исследование влияния стратификации атмосферного пограничного слоя на распространение акустического импульса вдоль поверхности земли. Сравнение с теорией | 78 |
| 2.3. Распространение акустического импульса в приземном волноводе с учетом нелинейных эффектов | 91 |
| Литература | 101 |
| Глава 3. Экспериментальное исследование эффектов рассеяния инфразвуковых волн на тонкой слоистой структуре стратосферы и мезосферы | 106 |
| 3.1. Предыстория акустических исследований тонкой слоистой структуры атмосферы | 107 |
| 3.2. Изучение пространственной и временной изменчивости тонкой слоистой структуры атмосферы с помощью серии последовательных взрывов | 112 |
| 3.3. Влияние тонкой слоистой структуры атмосферы на когерентность инфразвуковых сигналов на больших расстояниях от взрывов | 119 |
| Литература | 123 |
| Глава 4. Анизотропные флуктуации скорости ветра и температуры в устойчиво стратифицированной атмосфере | 127 |
| 4.1. Нелинейный механизм формирования анизотропных флуктуаций в устойчиво стратифицированной атмосфере | 129 |
| 4.2. Лагранжевы смещения | 130 |
| 4.3. Эйлеровы смещения | 131 |
| 4.4. Мгновенные вертикальные профили тонкой структуры атмосферы | 136 |
| 4.5. Механизм формирования анизотропных флуктуаций скорости ветра и температуры | 139 |
| 4.6. Связь корреляционных функций эйлеровых и лагранжевых случайных смещений и скоростей среды | 143 |
| 4.7. Спектры эйлеровых вертикальных смещений и горизонтальных скоростей | 148 |
| 4.8. Пространственно-временные (четырёхмерные) спектры вертикальных смещений и горизонтальных скоростей в области больших волновых чисел ($q^2 \gg 1$) | 158 |

| | |
|--|------------|
| 4.9. Одномерные спектры вертикальных смещений и горизонтальных скоростей..... | 159 |
| 4.10. Горизонтальные спектры в области больших волновых чисел | 163 |
| 4.11. Сравнение теоретических и экспериментальных горизонтальных спектров | 171 |
| 4.12. Частотные спектры вертикальных смещений и горизонтальных скоростей..... | 173 |
| Литература..... | 184 |
| Глава 5. Влияние атмосферных анизотропных неоднородностей на распространение и рассеяние инфразвуковых волн | 190 |
| 5.1. Флуктуации времени пробега акустических волн, вызванные ВГВ | 191 |
| 5.2. Дисперсия флуктуаций времени пробега звука вдоль луча | 193 |
| 5.3. Флуктуации времени пробега сигнала в стратосферном волноводе | 196 |
| 5.4. Структурная функция флуктуаций времени пробега $\delta\tau$ | 197 |
| 5.5. Частотный спектр флуктуаций времени пробега | 198 |
| 5.6. Измерение флуктуаций времени пробега акустических импульсов в устойчиво стратифицированном АПС | 199 |
| 5.7. Флуктуации азимута распространения акустической волны, вызванные ВГВ..... | 205 |
| 5.8. Моделирование методом ППУ распространения инфразвуковых волн в атмосфере с анизотропными флуктуациями..... | 207 |
| 5.9. Уравнение Бюргерса для акустической волны, распространяющейся вдоль лучевой трубки | 212 |
| 5.10. Оценки параметров N -волны в стратосфере и нижней термосфере | 215 |
| 5.11. Коэффициент отражения слоя, заполненного слоистыми неоднородностями..... | 217 |
| 5.12. Отраженное поле N -волны от слоя, заполненного слоистыми неоднородностями..... | 219 |
| 5.13. Численное моделирование распространения инфразвуковых сигналов в атмосфере с флуктуациями, вызванными ВГВ..... | 225 |
| 5.14. Частотный спектр отраженного сигнала..... | 227 |
| 5.15. Сравнение с экспериментальными спектрами стратосферных приходов..... | 229 |
| Литература..... | 230 |
| Глава 6. Инфразвуковое зондирование тонкой слоистой структуры атмосферы..... | 235 |
| 6.1. Акустическое зондирование средней атмосферы | 235 |
| 6.2. Связь формы отраженного сигнала с вертикальным профилем флуктуаций эффективной скорости звука..... | 236 |
| 6.3. Методика восстановления вертикальных профилей флуктуаций скорости ветра..... | 240 |
| 6.4. Результаты реконструкции вертикальных флуктуаций скорости ветра в атмосфере..... | 241 |
| 6.5. Вертикальные спектры восстановленных флуктуаций $\Delta C_{eff}(z)$ | 253 |
| Литература..... | 255 |