

Зенг Зонгуонг

Всплески в турбулентной среде и распространение излучения

Институт оптической и точной механики, г. Хейфей, Китай

Поступила в редакцию 10.09.2001 г.

На основании результатов измерений показано, что вихри с резким изменением температуры, а именно с разрывной температурной поверхностью (РТП), часто могут возникать в стратифицированной турбулентной среде. Поскольку РТП имеет сильно асимметричную структуру, то свойства распространения излучения могут отклоняться от теории изотропной турбулентности. Появление РТП, вероятно, связано с распадом вихрей в вертикальном направлении. Появление и распад таких вихрей могут называться всплесками.

Введение

Теория распространения излучения в турбулентной среде обычно основывается на теории изотропной турбулентности, и предполагается нормальное распределение флуктуаций показателя преломления. Эти теории и гипотеза часто не соблюдаются в реальных турбулентных потоках, особенно в турбулентной атмосфере.

Например, в свободной атмосфере наблюдаются слои с сильными инверсиями. Горизонтальный размер таких слоев более чем в десять раз превышает вертикальный [1], поэтому излучение, распространяющееся в горизонтальном направлении, искажается сильнее. На вершине конвективного пограничного слоя [2] граница между областью турбулентности и областью ламинарности нерегулярна, поэтому излучение, проходящее через верхнюю границу конвективного пограничного слоя, подвержено сильным флуктуациям из-за различных градиентов температуры в различных областях.

При ветре, дующем на границе между водной и воздушной поверхностями, излучение, распространяющееся в направлении доминирующего ветра, также испытывает сильные флуктуации из-за различных температурных градиентов в различных областях и вариаций градиента температуры, вызванных флуктуациями направления ветра. Если по одну сторону от границы находится нестабильная турбулентная область, а по другую – стабильная, то локальный структурный параметр [3] может иметь большой радиус пространственной корреляции, примерно в 10 раз превышающий эффективный внешний масштаб турбулентности. Радиус корреляции в горизонтальном направлении часто очень мал в случае равномерной турбулентности.

Организованные вихри, а именно когерентная структура, часто наблюдаются в турбулентных потоках [4]. Структура «наклонов» в конвективном пограничном слое атмосферы представляет собой пример когерентной структуры [5]. Вклад «наклонов» в структурную функцию показателя преломления второго порядка весьма невелик, притом что их масштаб достаточно большой. В определенных условиях на-

ветренная сторона наклонов, на которой происходит резкий скачок температуры, может влиять на распространение излучения [6]. Подобная структура наблюдалась в ночном стабильном пограничном слое, а структура «наклонов» – в водном резервуаре, используемом для имитации турбулентности [7].

В данной статье рассмотрим, как всплески, вызванные нестабильностью ветрового сдвига, влияют на распространение излучения. Образование и распад вихрей с резким изменением температуры в поперечном сечении, а именно с разрывной температурной поверхностью (РТП), в стратифицированной турбулентной среде называются «всплесками». Фактически такие вихри наблюдались в пограничном слое много лет назад [8], когда ветровые и температурные датчики, расположенные в различных точках, одновременно фиксировали резкое изменение сигнала, откуда могло быть установлено наличие РТП. Частота работы датчиков составляла более 500 Гц, поэтому толщина РТП достигала размеров внешнего масштаба турбулентности. В [8] представлены характеристики отраженных волн радара от РТП и изменение распределения вероятности флуктуаций волнового фронта, но отсутствует какой-либо анализ распространения излучения. Хотя мы и не можем полностью понять структуру этих вихрей, тем не менее попытаемся проанализировать влияние асимметрии РТП на распространение излучения.

1. Измерения

В данной работе всплески в нестабильном турбулентном потоке прослеживались на основе флуктуаций температуры, измеренных шар-зондовыми термометрами. Три датчика температуры с вольфрамовой нитью 10 мкм в диаметре и 2,4 см в длину устанавливались вдоль горизонтальной линии на вершине гондолы. Расстояние между датчиками составляло соответственно 1,07; 0,75 и 0,33 м. Уровень шума в датчике составлял 0,002 °С. Частотное разрешение датчика равнялось 0,02–30 Гц, а частота выборки – 25 Гц.

Шар-зонд опускался со скоростью около 5 м/с, таким образом пространственное разрешение датчиков составляло 20 см.

На основе результатов измерения было показано, что число Ричардсона $Ri < 0,25$ ниже 12 км и на некоторых высотах $Ri < 0,1$. Флуктуации температуры в вертикальном направлении подчиняются степенному закону « $-5/3$ » в районе масштабов с размерами 0,2–20 м. Значения C_n^2 в вертикальном направлении были приблизительно равны значениям в горизонтальном направлении. Более подробное описание см. в [9]. Примеры всплесков показаны на рис. 1.

Множество положительных скачков с сильными флуктуациями наблюдается на фоне плавно изменяющегося температурного тренда. Задний фронт скачков очень крутой, и его ширина часто меньше, чем разрешение датчика. Амплитуда этих скачков составляет примерно 0,1–0,3 °С. На рис. 1, б, в приведено более детальное изображение фрагментов А и Б. Часто фронт скачка фиксировался одновременно всеми тремя датчиками, свидетельствуя таким образом, что РТП представляет собой горизонтальную плоскость шириной более 1 м и толщиной менее 0,2 м. При внутреннем масштабе турбулентности порядка 5 см толщина РТП может достигать этого значения. По меньшей мере 45 РТП наблюдались в атмосферном слое 8500–10200 м. Средняя амплитуда падения температуры на РТП может быть представлена как $a\sigma_T = 0,16$ °С (σ_T – стандартная вариация температуры, $a = 2,6$). Вклад от 45 РТП в дисперсию флуктуаций температуры σ_T^2 составляет только 1,4%. Одна треть всех РТП имеют толщину менее 0,2 м и представляют собой плоскость

в горизонтальном направлении. Половина всех РТП имеют толщину 0,2–0,4 м и наклонены или изогнуты. Порог в 1 °С использовался для выделения всплесков. Сильно наклоненные РТП исключались из рассмотрения.

Происхождение РТП, рассмотренных выше, может быть легко объяснено. В свободной атмосфере с устойчивой стратификацией из-за неустойчивого ветрового сдвига масса воздуха из вышележащего слоя с более высокой температурой вовлекается в нижележащий слой с более низкой температурой и смешивается с окружающим воздухом с образованием множества горизонтальных РТП. Образование и распад вихрей с РТП, обладающих собственной характерной структурой, могут называться всплеском.

Расстояние b спуска теплой воздушной массы может быть рассчитано через градиент потенциальной температуры $d\theta/dz$:

$$b = a\sigma_T / (d\theta/dz) \sim 50 \text{ м.} \quad (1)$$

Очевидно, что моменты нечетного порядка флуктуаций с учетом РТП уже не равны нулю. На основании результатов измерений было показано, что поведение структурной функции нечетного порядка отличается от структуры температурных «наклонов» в конвективном пограничном слое. Более подробно о структурной функции нечетного порядка можно узнать в [10]. Структура вихрей с РТП пока не получила достаточного объяснения, однако мы можем проанализировать влияние РТП на особенности распространения излучения.

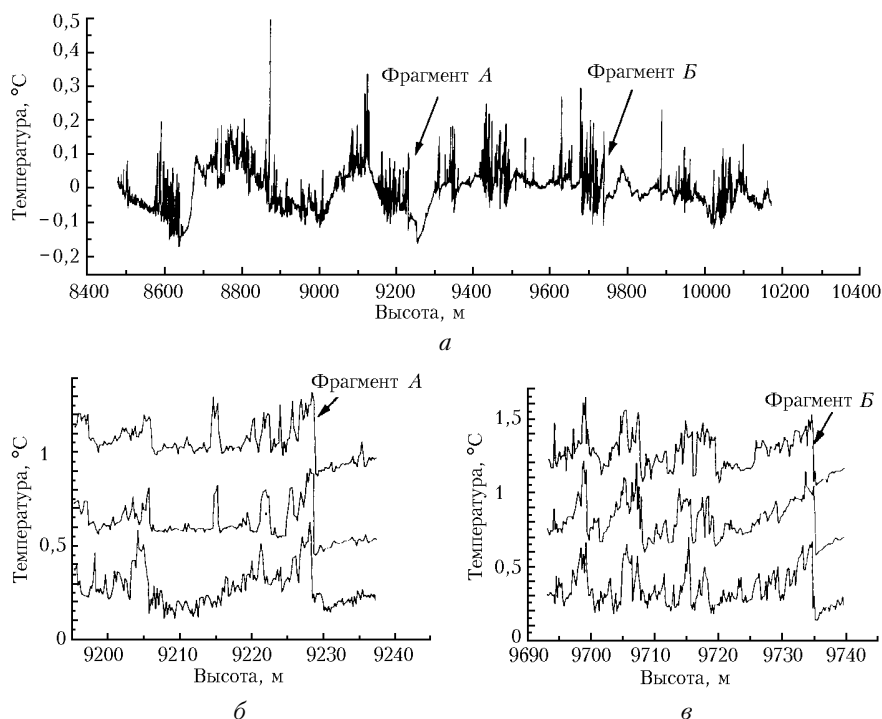


Рис. 1. Тренды температуры, измеренные тремя шар-зондовыми термометрами: тренд, измеренный средним датчиком (а); фрагменты А (б) и Б (в)

2. Распространение излучения

Поскольку всплески являются одной из разновидностей вихрей, будем использовать методы, применимые для работы с когерентной структурой. Величина флуктуаций турбулентного потока может быть разделена на две некоррелированные части, например флуктуации температуры

$$T' = T'_h + T'_b, \quad (2)$$

где T'_h представляет собой часть, удовлетворяющую условиям однородности и изотропии, а T'_b – член, ответственный за всплеск. Расчету подлежит только второй член. Поскольку внутренний масштаб турбулентности составляет несколько сантиметров в свободной атмосфере, метод геометрической оптики может использоваться в диапазоне нескольких километров. Максимальное значение флуктуаций угла прихода излучения благодаря действию РТП может быть рассчитано как

$$\alpha_{\max} = \int_L \frac{\delta N}{D} ds, \quad (3)$$

где D – диаметр приемной апертуры; δN – изменение показателя преломления в интервале D в вертикальном направлении; L – длина пути распространения излучения; ds – элемент луча. Предположим, что излучение распространяется в вертикальном направлении и РТП представляет собой полусферу толщиной l_0 (внутренний масштаб) и диаметром b . Пучок излучения, формируемый объективом, проходит через последовательность РТП. Поскольку $b \gg D$:

$$\alpha_{\max} = 2n\Delta N \sqrt{b/D}, \quad (4)$$

где n – число пройденных РТП; ΔN – изменение показателя преломления на РТП,

$$\Delta N = a\sigma_T M, \quad M = \frac{dN}{dT}. \quad (5)$$

Если обозначить внешний масштаб изотропной турбулентности через L_0 , то C_n^2 может быть представлена в виде

$$C_n^2 = 2\sigma_T^2 M^2 L_0^{-2/3}, \quad (6)$$

для колмогоровской турбулентности

$$\langle \alpha_h^2 \rangle = 2,91D^{-1/3} C_n^2 L. \quad (7)$$

Общая дисперсия дрожания будет представлять собой сумму двух частей – $\langle \alpha_k^2 \rangle + \langle \alpha_{\max}^2 \rangle$, их отношение равняется

$$\frac{\alpha_{\max}^2}{\langle \alpha_h^2 \rangle} = 0,69a^2 n^2 \left(\frac{b}{L} \right) \left(\frac{L_0}{D} \right)^{2/3}. \quad (8)$$

Известно, что для свободной атмосферы $L_0 = 30$ м. Предположим, что $D = 0,1$ м. Если длина пути распространения излучения составляет сотни метров, то вероятность того, что число РТП $n > 1$, очень мала, и мы можем предположить $n = 1$. Минимальное значение L можно оценить как

$$L_{\min} = V / \left(\frac{g}{T} \frac{d\theta}{dz} \right)^{2/3}, \quad (9)$$

где V – средняя скорость ветра; g – ускорение свободного падения. Средние наблюдаемые величины V , T были подставлены в уравнение (9) и это дало $L_{\min} = 1800$ м. Для оптических трасс с $n > 1$ возможны оценки $L_{\min} < 140$ м. В результате получим, что $\alpha_{\max}^2 / \langle \alpha_h^2 \rangle = 2,2 - 29$. Величина L_{\min} предполагает, что интервал турбулентной области будет 1800 м. Если излучение распространяется в горизонтальном направлении, то C_n^2 может быть намного меньше, чем при измерениях в вертикальном направлении. Поэтому мы можем наблюдать интенсивные флуктуации угла прихода излучения длительностью примерно $D/V \sim \sqrt{b/D}/V = 0,004 - 0,08$ с и высокой частотой повторения. Большие выступы могли бы быть найдены на тренде высокочастотной компоненты после окончания вейвлет-преобразования флуктуаций угла прихода излучения. Когда излучение распространяется на очень большие расстояния, вероятно $n > 1$ и $\alpha_b^2 \gg \langle \alpha_h^2 \rangle$. Поэтому свойства нормального распределения флуктуаций волнового фронта нарушаются, что может быть подтверждено экспериментальными наблюдениями. На кривой распределения вероятности флуктуаций угла прихода излучения (по данным [11]) наблюдается длинный хвост. Если РТП часто встречаются на пути излучения, то связь между C_n^2 и флуктуациями угла прихода излучения нарушается. Например, если пучок излучения проходит через все 45 РТП на пути в 1,7 км, то $\alpha_b^2 / \langle \alpha_h^2 \rangle \sim 0,7$ и измеренное изменение флуктуаций угла прихода излучения будет больше, чем значение, рассчитанное при помощи C_n^2 .

Логарифм флуктуаций амплитуды излучения, вызванных РТП, может быть рассчитан с применением методов геометрической оптики:

$$\chi_b = \int_0^L \int_0^s \frac{\partial^2 N}{\partial z^2} ds d\xi. \quad (10)$$

Дифференциал второго порядка от N в вертикальном направлении представляет собой импульс с амплитудой $\pm 2 \Delta N / l_0$, где l_0 – внутренний масштаб турбулентности. Если РТП представляет собой горизонтальную плоскость толщиной C , то

$$\chi_b^2 = 4\Delta N^2 / l_0^4 = 4a^2 (C/l_0)^4 \sigma_T^2 M^2, \quad (11)$$

для колмогоровской турбулентности

$$\langle \chi_k^2 \rangle = 2,46 C_n^2 L^3 l_0^{-7/3}, \quad (12)$$

и тогда

$$\chi_b^2 / \langle \chi_k^2 \rangle = 0,81 a^2 (C/L)^3 (C/l_0) (L_0/l_0)^{2/3}. \quad (13)$$

Предположим, что $l_0 = 0,1$ м и РТП представляет собой дугу. Как и ранее, $C = 2\sqrt{b/l_0}$. Предположим также, что $L = 140$ м, тогда $\chi_b^2 / \langle \chi_k^2 \rangle \sim 0,047$. Таким образом, влияние РТП на мерцания мало. Но

если РТП встречаются часто, можно найти изменения в верхней части спектра мерцаний.

При прохождении пучка излучения через турбулентную среду определенная характерная структура может наблюдаться в картине распределения излучения в условиях слабой турбулентности. Реальная картина этого явления не может быть получена из теории изотропной турбулентности [12]. Пример приведен на рис. 2, где изображен лазерный пучок после прохождения через верхнюю границу конвективного

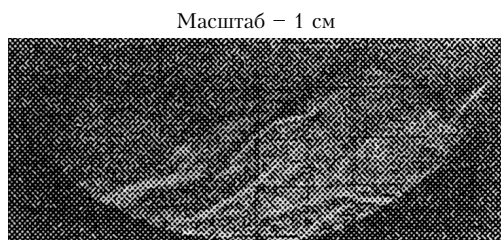


Рис. 2. Картина излучения лазерного пучка, прошедшего через верхнюю границу конвективного пограничного слоя атмосферы, смоделированного в водном резервуаре

пограничного слоя, смоделированного в водном резервуаре. Темная линия в верхней части рисунка, подчеркнутая снизу яркой линией, показывает конвективный вихрь, достигающий инверсионного слоя на верхней границе конвективного пограничного слоя. Согласно распределению показателя преломления на РТП и выражению (10) эта структура может быть легко объяснена. Структура, в которой яркая линия подчеркнута темной линией, наблюдается при прохождении лазерного пучка через конвективный турбулентный поток, смоделированный в водном резервуаре.

3. Выводы и обсуждение

На основании результатов измерений в атмосфере было показано существование всплесков с резким изменением температуры в стратифицированной турбулентной среде и были проанализированы свойства распространения излучения через РТП. Структура РТП сильно асимметрична, и это существенно отличает ее от изотропной турбулентности. В направлении, перпендикулярном РТП, масштаб области разрывной поверхности весьма невелик, а изменения показателя преломления значительны. В направлении, касательном к РТП, этот масштаб уже значителен и радиус корреляции очень большой. Таким образом, некото-

рые характеристики распространения излучения обусловлены РТП. Если большое число РТП встречается на пути излучения, то их масштаб велик и РТП параллельны пучку излучения, тогда не только проекция может возникнуть на высокочастотном участке спектра мерцаний или флуктуаций угла прихода излучения, но и более интенсивные и высокочастотные флуктуации угла прихода излучения возникают более часто, так что распределение вероятности флуктуаций угла прихода излучения может быть искажено. Кроме того, измеренные изменения флуктуаций угла прихода излучения, очевидно, могут быть больше, чем значения, рассчитанные с помощью C_n^2 .

На основании характерной структуры излучения, прошедшего через турбулентную среду, мы можем обнаружить большие вихри в среде. Анализ картины излучения представляет собой удобный метод выявления структуры турбулентного потока.

Некоторые из особенностей турбулентности, такие как изотропия рассеяния, могут нарушаться в турбулентном потоке, когда доминируют всплески или когерентная структура.

Из-за сложного характера турбулентного потока, особенно в атмосфере, вихри с РТП, возможно, широко распространены и в других средах.

1. *Daluder F. et al. // J. Atmos. Sci. 1994. V. 51. P. 237–238.*
2. *Виниченко Н.К. Турбулентность в свободной атмосфере. М.: Гидрометеониздат, 1990.*
3. *Tatarskiĭ V.I. // Ratio Sci. 1987. V. 22. P. 859–865.*
4. *Frish U. and Orszag S.A. // Phys. Today. 1990. V. 43. P. 24–32.*
5. *Antonia R.A., Chambers A.J. et al. // J. Atmos. Sci. 1979. V. 36. № 1. P. 99–107.*
6. *Renming Y. and Zongyong Z. A study of optical properties of coherent structure // Acta opt. sin. (in press).*
7. *Renming Y. and Zongyong Z. A study of turbulent properties of convective tank // Acta mech. sin. 2000. V. 32. № 3. P. 257–263.*
8. *Zongyong Z. // Proc. SPIE. 1989. V. 1114. P. 23–27.*
9. *Zongyong Z., Jun Z. et al. // Sci. atmos. sin. 1997. V. 21. № 3. P. 380–384.*
10. *Antonia R.A. and Chambers A.J. // Boundary-Layer Meteorol. 1982. № 23. P. 395–403.*
11. *Jun Z. and Zongyong Z. // Acta opt. sin. 1997. V. 17. № 12. P. 1259–1264.*
12. *Зонгюнг З., Нингуан В., Джун Ш., Янгджун В. Мерцания и измерения волнового фронта // Оптика атмосф. и океана. 1992. Т. 12. № 5. С. 1309–1313.*

Zeng Zongyong. Bursts in the turbulent medium and light propagation.

Based on the measurements, it is shown that the eddies with sharply changing temperature, i.e. with temperature discontinuous surface (TDS) can often appear in a stratified turbulent medium. Because the structure of TDS is very asymmetrical, light propagation properties can deviate from the isotropic turbulence theory. The appearance of TDS is probably connected with breakdown of eddies in the vertical direction. The formation and breakdown of the eddies can be named «bursts».