

РЕЗУЛЬТАТЫ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АНИЗОТРОПИИ ТУРБУЛЕНТНЫХ ДВИЖЕНИЙ, НАБЛЮДАЕМЫХ В МЕТЕОРНОЙ ЗОНЕ АТМОСФЕРЫ

И. А. Делов

Как показывают фотографические [1] и радиолокационные [2, 3, 4] наблюдения метеорных следов, крупномасштабные вихри в метеорной зоне атмосферы имеют явно выраженную анизотропию, степень которой достигает порядка 25. Число Рейнольдса Re для таких вихрей достаточно велико [4] и составляет $\sim 5 \cdot 10^4 \div 3 \cdot 10^5$.

Известно, что при больших числах Рейнольдса в силу действия таких факторов, как силы давления, а также силы вязкости, которые приводят к выравниванию различных компонент турбулентной скорости в диапазоне более высоких волновых чисел, для определенного спектра вихрей турбулентных движений, наблюдаемых в метеорной зоне атмосферы, не исключено существование заметной изотропной области [5].

В настоящее время этот вопрос исследован недостаточно полно. Имеющиеся в литературе теоретические [6, 7] и экспериментальные [8] оценки предела анизотропии весьма малочисленны и приближенны.

В данной статье приводятся результаты оценки предела анизотропии турбулентных движений, выполненной на основании достаточно большого статистического материала, полученного в результате базисных радиоизмерений метеорных следов. Измерения проводились в Харькове в течение 1962 года. Аппаратура и методика измерений подробно описана в работах [9, 10]. Предварительные данные об этом вопросе были сообщены нами ранее [14].

Как известно, изотропную область в спектре вихрей можно выявить с помощью структурных либо спектральных функций [11], построенных для различных направлений, а следовательно, и для различных составляющих скорости.

В случае изотропной турбулентности все три составляющие турбулентной скорости равны между собой. Следовательно, структурные или спектральные функции, рассчитанные отдельно для каждой составляющей скорости, имеют одинаковые значения для того спектра вихрей, где движение изотропно.

Для оценки предела анизотропии турбулентных движений, наблюдаемых в метеорной зоне, построены поперечные структурные функции вида

$$D_{\text{пп}}(\Delta r) = \overline{(u_{r_1} - u_{r_2})^2} = \Delta u \quad (1)$$

для различных значений зенитных углов метеорных следов.

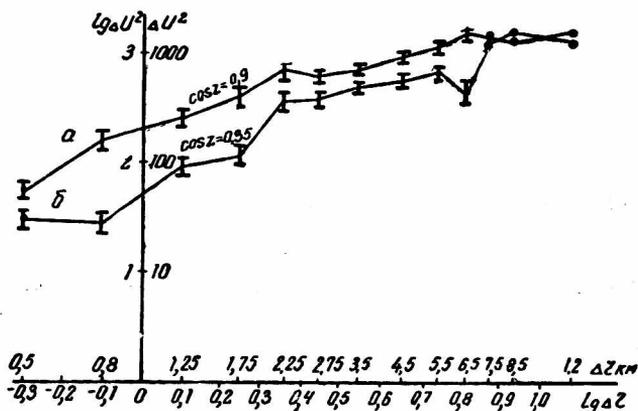
Здесь u_{r_1} и u_{r_2} — радиальные составляющие скорости дрейфа метеорного следа соответственно в точках 1 и 2; Δr — расстояние между этими точками вдоль следа.

Поскольку с изменением зенитного угла z меняется вклад составляющих скорости в измеренное значение u_r , при наличии изотропной

области в спектре вихрей структурная функция $D_{пп}(\Delta r)$ для этой области не будет зависеть от величины зенитного угла.

На рисунке приведены две структурные функции $D_{пп}(\Delta r)$, одна из которых рассчитана для зенитных углов $z \approx 70^\circ$, другая — для $z \approx 18^\circ$. При построении указанных структурных функций все данные базисных измерений, полученные за период круглосуточных систематических измерений, проводившихся с апреля по декабрь 1962 г., были разбиты по значениям z на две группы. Одна для $z \approx (53 \div 89^\circ)$ со средним значением $z \approx 70^\circ$, другая — для $z \approx (0 \div 37^\circ)$ со средним значением $z \approx 18^\circ$.

Ошибка для каждой точки на графике рассчитывалась как $m_m = \frac{m}{\sqrt{2n}}$, где m — среднеквадратичное значение отклонений величины $D_{пп}(\Delta r)$ от ее среднего значения, а n — число наблюдений.



Поперечная структурная функция поля скоростей для двух значений зенитного угла z : а — для $z = 18^\circ$; б — для $z = 70^\circ$.

Как следует из рисунка, структурная функция, построенная для зенитных углов $z \approx 18^\circ$, имеет значительно большие значения практически для всех значений Δr и на графике проходит несколько выше оси $D_{пп}(\Delta r)$, чем структурная функция, построенная для зенитных углов $z \approx 70^\circ$. Это, видимо, можно объяснить действием двух факторов. Во-первых, для больших значений углов z уменьшается вклад в измеренное значение u_p от горизонтальной составляющей турбулентной скорости и увеличивается от вертикальной составляющей. Но если в силу анизотропии вертикальные составляющие скорости окажутся значительно меньше горизонтальных, то значение структурной функции с увеличением z будет уменьшаться, что мы и наблюдаем. Во-вторых, кроме этого эффекта здесь сказывается также и эффект осесимметричности, который в основном проявляется для метеорных следов, образованных метеорными частицами, проходящими с боковых направлений. Поскольку в силу предполагаемой анизотропии вихрей горизонтальные размеры их могут оказаться значительно больше вертикальных, величина $D_{пп}(\Delta r)$, измеренная для одинаковых значений Δr , но для различных зенитных углов, будет относиться к различным вихрям. Так, при одинаковых Δr для меньших зенитных углов значение $D_{пп}(\Delta r)$ будет больше, поскольку, измеренная величина $D_{пп}(\Delta r)$ в данном случае характеризует вихри больших размеров. В результате этот эффект также приведет к смещению структурной функции вниз по оси абсцисс с уменьшением зенитного угла.

Наблюдаемое смещение структурной функции по оси $D_{пп}(\Delta r)$ с изменением величины z не может быть обусловлено влиянием градиента скорости регулярного ветра, поскольку, согласно работам [12, 13], в среднем его величина не превышает ~ 3 м/сек/км, тогда как различие структурных функций для двух значений z при $\Delta r \approx 0,5$ км составляет ~ 60 м²/сек², а при $\Delta r \approx 6$ км ~ 770 м²/сек².

Таким образом, полученные нами экспериментальные данные позволяют сделать вывод о том, что турбулентные движения в метеорной зоне существенно анизотропны вплоть до минимально наблюдаемого на длине волны $\lambda \approx 8$ м размера вихрей, равного $\sim 0,5$ км. Этот вывод находится в удовлетворительном согласовании с теоретическими оценками предела анизотропии [6, 7], согласно которым изотропная область в спектре вихрей для метеорной зоны должна наблюдаться для вихрей, имеющих размеры менее ~ 100 м.

Анизотропия турбулентных движений в метеорной зоне, как предполагается, обусловлена действием архимедовых сил, вызывающих непосредственно ослабление вертикальной составляющей скорости. Полученные нами данные находятся в согласии с этим предположением: с увеличением зенитного угла значение структурной функции уменьшается, что, естественно, связано с тем, что вертикальная составляющая турбулентной скорости значительно меньше горизонтальной.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Лиллер, Ф. Уиппл. Ветры в верхней атмосфере по фотографиям метеорных следов. Сб. «Ракетные исследования верхней атмосферы». Изд-во иностр. лит., 1957.
2. J. S. Greenhow, E. L. Neufeld. Measurement of turbulence in the 80 to 100 km region from the radio observation of meteors. L. Geoph. Res. 64, 21/29, 1959.
3. J. S. Greenhow, E. J. Neufeld. Longe scale irregularities in high altitude winds. Pros. Sos. 75, 228, 1960.
4. И. А. Делов. Турбулентные движения в верхней атмосфере на высотах 80—110 км по данным радионаблюдений метеорных следов. Сб. «Физика комет и метеоров, Серия астрономическая и астрофизическая» Изд-во «Наукова думка», 1965.
5. В. М. Татарский. Радиофизические методы изучения атмосферной турбулентности. «Изв. вузов, Серия радиофизическая», 3, № 4, 1960.
6. J. P. Dougherty. The anisotropy of turbulence at the meteor level. J. Atmos. and terrest. Rhys., 21, 2—3, 1961.
7. Г. М. Тептин. Некоторые оценки параметров турбулентности метеорной области атмосферы. Результаты исследований по программе МГГ. Ионосферные исследования № 13. Изд-во «Наука», 1964.
8. C. C. Justus. The eddy diffusivities, energy balance parameters and heating rate of upper atmospheric turbulence. J. Geoph. Res. 75, 1035, 1967.
9. И. А. Делов. Аппаратура и методика исследований нерегулярных движений в метеорной зоне. Результаты исследований по международным геофизическим проектам. Сб. «Исследование метеоров», 1966, № 1.
10. И. А. Делов, Б. Л. Кашеев, Л. И. Борович. Основні характеристики турбулентного руху в атмосфері Землі на висоті 90—100 км. Доповіді АН УРСР, № 8, 1051, 1964.
11. P. Volgiano. Evidence of anisotropy in tropospheric microstructure. J. Geophys. Rej. 68, 16, 1963.
12. И. А. Делов. Турбулентные движения и их связь с другими явлениями. Сб. «Проблемы космической физики», вып. 1, 126, Метеоры. Изд. ун-та, Киев, 1966.
13. J. S. Greenhow, E. L. Neufeld. The height variation of upper atmospheric winds. Philos. Mag. Ser., 8, 9, 1157, 1956.
14. И. А. Делов, Г. М. Тептин. Структурная функция поля скоростей метеорной области атмосферы. Сб. «Метеорное распространение радиоволн», вып. V—VI, Изд-во ун-та, Казань, 1969.