

*И. А. ДЕЛОВ, канд. техн. наук, Н. И. СЛИПЧЕНКО, канд. техн. наук, А. В. ЛЕОНИДОВ*  
**О МЕХАНИЗМЕ, ВЫЗЫВАЮЩЕМ НАБЛЮДАЕМУЮ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ  
АНИЗОТРОПИЮ ДЛИНЫ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА МОЛЕКУЛ АТМОСФЕРЫ**

**Введение**

В [1] в результате радиолокации ионизованных метеорных следов установлено, что два параметра ионизованного метеорного следа (коэффициент амбиполярной диффузии  $D_a$  и начальный радиус метеорного следа  $r_0$ ) в сильной степени анизотропны. Их величины в горизонтальном направлении оказались значительно больше, чем в вертикальном. Поскольку эти параметры метеорного следа ( $D_a$  и  $r_0$ ) связаны с параметрами атмосферы известными соотношениями  $D_a \sim \lambda v$  и  $r_0 \sim \lambda$ , где  $\lambda$  – длина свободного пробега молекул, а  $v$  – хаотическая скорость молекул, была высказана гипотеза о существовании в атмосфере Земли анизотропии молекулярных процессов ( $v$  и  $\lambda$ ), связанной с температурной стратификацией атмосферы.

Эта гипотеза проверялась затем на других высотах с помощью двух различных способов. На высоте до  $\sim 200$  м эта гипотеза проверялась с помощью дистанционного акустического импульсного зондирования. Использовался фазовый способ. Производилась оценка анизотропии хаотической скорости молекул путем измерения фазы акустического эхо-сигнала  $\varphi$  при различных углах места [2]. При этом принималось во внимание, что фаза акустического эхо-сигнала  $\varphi$  связана с хаотической скоростью молекул  $v$  соотношением  $\varphi \sim 1/v$ .

Полученные многочисленные экспериментальные данные подтвердили существование анизотропии хаотической скорости молекул на высотах до 200 м. Причем анизотропия хаотической скорости молекул определенным образом связана с температурной стратификацией атмосферы и с погодными условиями.

В дальнейшем [3, 4] проверка гипотезы производилась на высоте  $\sim 20$  м и 1,5 м с помощью специально разработанного контактного способа путем непосредственного измерения величины хаотической скорости молекул  $v$  одновременно в четырех направлениях в вертикальной плоскости: для молекул, летящих сверху, снизу, и в горизонтальной плоскости слева и справа.

На высоте 1,5 м измерения проводились на полигоне, на высоте  $\sim 20$  м – в черте города. Проведенные многочисленные измерения этим способом подтвердили существование анизотропии хаотической скорости молекул и на этих высотах, и, следовательно, теперь можно с уверенностью говорить о существовании в атмосфере Земли нового эффекта – эффекта различия среднего значения хаотической скорости молекул для горизонтального и вертикального направления, который определенным образом связан с погодными условиями и температурной стратификацией атмосферы.

Кроме того, в процессе измерений анизотропии хаотической скорости молекул было установлено еще два новых эффекта анизотропии. Один из них свидетельствовал о различии хаотической скорости молекул, летящих вниз и вверх, другой – о различии хаотической скорости молекул в потоке горизонтального ветра для молекул, летящих по ветру и против ветра.

Таким образом, в настоящее время можно уже говорить о существовании в атмосфере Земли нового явления – явления анизотропии молекулярных процессов, которое проявляется упомянутыми выше тремя эффектами.

В результате теоретических и экспериментальных исследований был раскрыт механизм, вызывающий анизотропию хаотической скорости молекул. В частности, для молекул, летящих в вертикальной плоскости, анизотропия их вызывается действием сил тяжести молекул и высотным градиентом плотности атмосферы.

В настоящей статье сделана попытка определить механизм, вызывающий анизотропию длины свободного пробега молекул.

## Методика исследований и результаты

Проанализируем этот вопрос с точки зрения газокINETической теории.

Известно, что основными параметрами атмосферы Земли, определяющими физику и динамику ее, являются: плотность  $\rho$ , температура  $T$  и давление  $P$ . Известно также, что для любой точки атмосферы давление определяется весом столба воздуха, находящегося над этой точкой, и для изотермической атмосферы, какой можно считать атмосферу на высоте 90 – 95 км, выражается как

$$P = k\rho T, \quad (1)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана.

Согласно закону Паскаля, давление газа или жидкости в данной точке передается во все стороны одинаково, т.е. для всех направлений величина  $P = const$ . Таким образом, в каждой точке атмосферы для любого направления с изменением одной из двух величин ( $\rho$  или  $T$ ) вторая величина должна изменяться в другую сторону во столько же раз, чтобы обеспечить для этого направления  $P = const$ .

Известно [5], что величина  $T$  связана с хаотической скоростью молекул соотношением

$$T = \frac{mv^2}{3k}, \quad (2)$$

где  $m$  – масса частицы воздуха, а плотность атмосферы  $\rho$  связана с длиной свободного пробега молекул  $\lambda$  соотношением

$$\rho = \frac{\sqrt{2}}{\lambda\sigma}, \quad (3)$$

где  $\sigma$  – эффективный поперечник сечения молекулы.

Представим выражение (1) с учетом зависимостей  $T$  (2) и  $\rho$  (3) следующим образом:

$$P = \frac{\sqrt{2}mv^2}{3k\sigma\lambda}. \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что величина  $P$  определяется соотношением

$$P = A \frac{v^2}{\lambda}, \quad (5)$$

где  $A = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \frac{m}{k\sigma}$ . Т.е. величина  $P$  определяется двумя величинами –  $v$  и  $\lambda$ .

Таким образом, если за счет действия какого-то фактора хаотическая скорость молекул  $v$  изменится, например, для вертикального направления, в  $n$  раз, то чтобы величина  $P$  для этого направления не изменилась, длина свободного пробега  $\lambda$  для этого направления соответственно должна измениться согласно выражения (4) в  $n^2$  раз. Например, если допустить, что скорость молекул в вертикальном направлении увеличилась в 2 раза, то, для того, чтобы величина  $P$  не изменилась, длина свободного пробега молекул  $\lambda$  в этом направлении должна, согласно (4), возрасти в  $n^2$  раз, т.е. в четыре раза.

На основании этих рассуждений можно заключить, что длина свободного пробега молекул  $\lambda$  в данном случае в вертикальном направлении, должна меняться под действием закона Паскаля вследствие изменений хаотической скорости молекул в этом направлении. Причем, коэффициент анизотропии для  $\lambda$  должен быть больше коэффициента анизотропии для  $v$  согласно (4) и выражаться соотношением  $K_\lambda = K_v^2$ .

Оценим, каково же должно быть в этом случае соотношение между измеряемыми коэффициентами анизотропии величин  $D_v$  и  $r_0$ .

Допустим, что анизотропия величин  $D_u$  и  $r_0$  вызывается изменением вертикальной составляющей хаотической скорости молекул  $v_z$ . Поскольку величина  $D_u$  определяется соотношением  $D_u \sim \lambda v$ , а величина  $r_0$  определяется соотношением  $r_0 \sim \lambda$ , то коэффициент анизотропии для  $D_u$  будет определяться как

$$K_{D_u} = \frac{D_{uz}}{D_{uw}}, \quad (6)$$

где  $D_{uz}$  – значение  $D_u$  для вертикального направления, а  $D_{uw}$  – значение  $D_u$  для горизонтального направления, а коэффициент анизотропии для  $r_0$  будет определяться как

$$K_{r_0} = \frac{r_{0z}}{r_{0w}}, \quad (7)$$

где  $r_{0z}$  – значение  $r_0$  для вертикального направления, а  $r_{0w}$  – значение  $r_0$  для горизонтального.

С учетом того, что  $D_u \sim \lambda v$ , а  $r_0 \sim \lambda$ , запишем выражения (6) и (7) таким образом:

$$K_{D_u} = \frac{\lambda_z v_z}{\lambda_w v_w}, \quad (8)$$

$$K_{r_0} = \frac{\lambda_z}{\lambda_w}. \quad (9)$$

Из выражений (8) и (9) следует, что коэффициент анизотропии для  $D_u$  равен произведению коэффициентов анизотропии для  $\lambda$  и  $v$ , так как  $K_\lambda = \frac{\lambda_z}{\lambda_w}$ ,  $K_v = \frac{v_z}{v_w}$ , т.е.

$$K_{D_u} = K_v K_\lambda, \quad (10)$$

для  $r_0 - K_{r_0} = \frac{\lambda_z}{\lambda_w}$ , т.е.

$$K_{r_0} = K_\lambda. \quad (11)$$

Следовательно, коэффициент анизотропии для  $D_u$  ( $K_{D_u}$ ) согласно (10) равен произведению коэффициента анизотропии для  $v$  и  $\lambda$ , а для  $r_0$  согласно (11) коэффициент анизотропии  $K_{r_0} = K_\lambda$ , т.е. всегда измеряемый коэффициент анизотропии для  $D_u$  ( $K_{D_u}$ ) должен быть больше измеряемого коэффициента анизотропии для  $r_0$  ( $K_{r_0}$ ), причем на величину коэффициента анизотропии для хаотической скорости молекул  $v$  ( $K_v$ ), т.е.  $\frac{K_{D_u}}{K_{r_0}} = \frac{K_\lambda K_v}{K_\lambda} = K_v$ .

Рассмотрим, в каком соотношении находятся коэффициенты анизотропии для  $D_u$  и  $r_0$ , ожидаемые согласно представленных здесь теоретических выводов и полученных в результате экспериментальной оценки измеряемых одновременно коэффициентов анизотропии для  $D_u$  и  $r_0$ .

Для этого обратимся к табл. 1, где представлены результаты измерений коэффициентов анизотропии для  $D_u$  в трех различных экспериментах [6, 7, 8] и для одного эксперимента [8] результаты одновременного измерения коэффициентов анизотропии для  $D_u$  и  $r_0$ . Представленные результаты получены по методике [1].

Таблица 1

Время проведения эксперимента	[8] 1975	[6] 1966	[7] 1971
Величина $K_{D_0}$	2,7	2,1	1,8
Величина $K_{r_0}$	2,4	–	–

В табл. 2 представлены результаты измерений коэффициентов анизотропии  $K_{D_0}$  и  $K_{r_0}$  для этих же экспериментальных данных, но полученные с помощью другой методики.

Таблица 2

Время проведения эксперимента	[8] 1975	[6] 1966	[7] 1971
Величина $K_{D_0}$	17	8	5
Величина $K_{r_0}$	10	–	–

В табл. 1 представлены результаты определения коэффициентов анизотропии для  $D_0$  и  $r_0$  в предположении, что их величина не слишком большая. Для этого случая при определении коэффициентов анизотропии  $K_{D_0}$  и  $K_{r_0}$  принималось, что зависимости  $\lg A_r = f(\lg \epsilon)$  и  $\lg A_r = f(\lg \alpha)$  можно представить прямыми. Однако при очень сильной анизотропии, например, когда исследуемая величина является вектором, ориентированным горизонтально, зависимость  $\lg A_r = f(\lg \epsilon)$  не является прямой. В этом случае величина  $A_r$  является функцией  $\cos \epsilon$  и определяется как  $A_{r_{\text{пр}}} = A_r \cos \epsilon$  или  $A_{r_{\text{пр}}} = A_r \sin \alpha$ . Поэтому использование зависимости  $\lg A_{r_{\text{пр}}} = f(\lg \epsilon)$  для оценки  $A_{r_{\text{мин}}}$  приводит к существенному завышению определяемой величины  $A_{r_{\text{мин}}}$ . Более точные результаты при оценке величины  $A_{r_{\text{мин}}}$  можно получить, используя зависимость  $\lg A_{r_{\text{пр}}} = f(\lg \alpha)$ , поскольку эта величина наиболее близко аппроксимируется прямой. В этом случае оценка величины  $A_{r_{\text{мин}}}$  производится путем экстраполяции прямой  $\lg A_{r_{\text{пр}}} = f(\lg \alpha)$  до значений  $\alpha_1$ , близких нулевым.

В табл. 2 представлены результаты определения коэффициентов анизотропии для  $D_0$  и  $r_0$  по этой уточненной методике. Как следует из табл. 2, уточненные значения величин  $K_{D_0}$  и  $K_{r_0}$  оказались значительно больше значений, приведенных в табл. 1.

Как следует из табл. 1 и 2, полученные результаты оценки коэффициентов анизотропии для  $D_0$  и  $r_0$  существенно отличаются друг от друга и находятся в качественном согласии с выводами, ожидаемыми согласно теоретических оценок, согласно которых величина  $K_{D_0}$  всегда должна быть больше величины  $K_{r_0}$ .

### Выводы

1. Анизотропия длины свободного пробега молекул ( $\lambda$ ) в атмосфере в вертикальном направлении вызывается действием закона Паскаля при изменении в этом направлении хаотической скорости молекул.

2. Коэффициент анизотропии длины свободного пробега молекул ( $K_\lambda$ ) всегда должен быть больше анизотропии хаотической скорости молекул ( $K_v$ ) в  $Kv^2$  раз.

3. При одновременном измерении коэффициентов анизотропии величин  $D_0$  и  $r_0$  коэффициент анизотропии хаотической скорости молекул  $K_v$  определяется как отношение коэф-

фициентов  $\frac{K_{D_0}}{K_{r_0}} = K_\lambda$ , причем всегда  $K_{D_0} > K_{r_0}$ .

**Список литературы:** 1. *Делов И.А.* Анизотропия параметров ионизованного метеорного следа, связанных с молекулярными процессами в атмосфере. Изв. АН СССР. Геомагнетизм и аэрономия. 1986. Т. 26, № 2. С. 265–268. 2. *Делов И.А., Слипченко Н.И.* Результаты экспериментальных исследований анизотропии молекулярных процессов атмосферы с помощью акустического зондирования. // Прикладная радиоэлектроника. 2004. Т. 3. № 3. С. 27–36. 3. *Бондаренко М.Ф., Слипченко Н.И., Делов И.А., Леонидов А.В.* Результаты измерений анизотропии температуры атмосферы в приземном слое Земли контактными способом // Прикладная радиоэлектроника. 2005. Т. 4, № 4. С. 383–393. 4. *Делов И.А., Слипченко Н.И., Леонидов А.В.* Анизотропия вертикальной составляющей хаотической скорости молекул атмосферы Земли // Радиотехника: Всеукр. науч.-техн. сб. 2007. Вып. № 148. С. 288–298. 5. *Большая советская энциклопедия.* М.: Сов. энциклопедия. М., 1972. Т. 25. С. 417; Т. 8. С. 355. 6. *Делов И.А.* Аппаратура и методика исследования нерегулярных движений в метеорной зоне. Результаты исследований по международным геофизическим проектам // Исследование метеоров. 1966. № 1. с. 133. 7. *Жуков В.* Исследование высотных зависимостей метеорных явлений: Автореф. дис... канд. техн. наук. Харьков, 1971. 21 с. 8. *Делов И.А., Жуков В.В.* Исследование начального радиуса метеорных следов с использованием высотомерного устройства // Проблемы космической физики. Вып. 10. Киев, 1975. С. 68–76.

*Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники*

*Поступила в редколлегию 08.10.2008*