

## НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ФАЗОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧЕСКИХ ЭХО-СИГНАЛОВ ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ АТМОСФЕРЫ ОДНОВРЕМЕННО В ДВУХ РАЗЛИЧНЫХ ПО УГЛУ МЕСТА НАПРАВЛЕНИЯХ

### 1. Введение

В работе [1] на основании статистического анализа данных радионаблюдений ионизированных метеорных следов было показано, что параметры ионизированного метеорного следа, такие как коэффициент амбиполярной диффузии ( $D_a$ ) и начальный радиус ионизированного метеорного следа ( $r_0$ ), анизотропны. Величина этих параметров в горизонтальном направлении оказалась значительно больше, чем в вертикальном направлении. Экспериментальные данные [1] относятся в основном к высоте 90-95 км, где, как известно [2], наблюдается резкий рост температуры с высотой. Кроме того, экспериментальные данные [1] были получены в основном для ночного времени суток и для утренних часов, когда, согласно [2], на этих высотах можно ожидать устойчивую температурную стратификацию атмосферы. К этому времени относится основная численность полученных экспериментальных данных [1]. Все это дает основание экспериментальные данные [1] отнести к устойчиво стратифицированной атмосфере.

На основании всего этого, поскольку величина  $D_a$  связана с хаотической скоростью молекул, а начальный радиус  $r_0$  связан с длиной свободного пробега молекул, в [1] была высказана гипотеза о возможности существования в атмосфере Земли анизотропии молекулярных процессов (хаотической скорости молекул и длины свободного пробега молекул), связанной определенным образом с температурной стратификацией атмосферы, подобно тому, как это имеет место для пульсаций скорости ветра, пульсаций температуры и других параметров атмосферы.

Согласно гипотезе Моница [3], в температурно-стратифицированной атмосфере все флуктуации плотности как крупномасштабные, так и мелкомасштабные, должны испытывать воздействие архимедовых сил и потому вертикальное направление будет выделенным для компонент турбулентности любых масштабов.

Если, согласно [3], архимедовы силы в температурно-стратифицированной атмосфере действуют на все флуктуации плотности вплоть до мельчайших, то почему не допустить, что действие архимедовых сил может определенным образом проявляться и на отдельных молекулах, которые являются составляющими мельчайших флуктуаций плотности атмосферы.

В [1] данные получены по радионаблюдениям ионизированных метеорных следов, на которых могло как-то сказаться действие электрических или магнитных полей различного происхождения. Поэтому представляет интерес оценить анизотропию молекулярных процессов в температурно-стратифицированной атмосфере для нейтрального состояния атмосферы. В частности, в данной статье мы представляем экспериментальные данные оценки анизотропии молекулярных процессов атмосферы (в частности температуры атмосферы) в пограничном атмосферном слое (ПАС), где, как известно, атмосфера считается электрически нейтральной.

### 2. Методика

Для оценки анизотропии молекулярных процессов атмосферы в ПАС использовался специально разработанный способ измерения относительных изменений температуры при одновременном акустическом зондировании атмосферы в двух различных по углу места направлениях [4].

Суть способа состоит в измерении начальной фазы временных колебаний принятых звуковых эхо-сигналов при одновременном акустическом зондировании атмосферы в двух различных по углу места направлениях. Причем начальная фаза временных колебаний для каж-

дого направления измерялась в один и тот же момент времени спустя после излучения звуковой волны ( $t=\Delta t_{cmp}$ ) и на одинаковом расстоянии от источника излучения ( $R_1=R_2$ ).

Для понимания сути способа обратимся к рис.1, где представлены две звуковые волны, имеющие одинаковый период временных колебаний  $T$ , но разные длины волн (на рис.1  $\lambda_1=2\lambda_2$ ). Эти звуковые волны начали распространяться от поверхности Земли в одно и то же время и на рис.1 зафиксированы в момент времени  $t=T$  спустя после их излучения. В момент времени  $t=T$  звуковая волна, имеющая длину волны  $\lambda_1$ , достигла высоты  $h_1$ , а звуковая волна, имеющая длину волны  $\lambda_2$ , достигла высоты  $h_2$ . Сравним фазы волн на одной и той же высоте  $h_0$ . Так, для звуковой волны с  $\lambda_2$  фаза волны на высоте  $h_0$  имеет величину  $180^\circ$ , тогда как фаза звуковой волны с длиной  $\lambda_1$  на этой высоте  $h_0$  имеет величину  $90^\circ$ . Если с этой высоты  $h_0$  в момент времени  $t=T$  мы начнем принимать рассеянную звуковую волну, то начальная фаза временных колебаний звуковой волны для  $\lambda_2$  будет иметь величину  $180^\circ$ , а для звуковой волны, имеющей длину волны  $\lambda_1$ , она будет равна  $90^\circ$ .

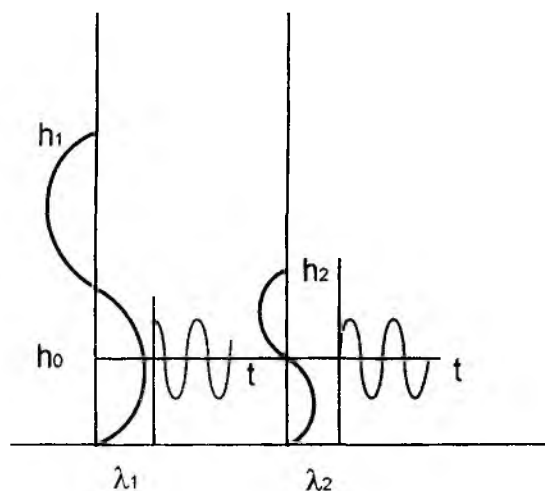


Рис. 1

Разность фаз между фазой временных колебаний излучаемой звуковой волны, которую она имела в данный фиксированный момент времени  $t$  (в нашем случае, представленном на рис.1, она равна  $360^\circ$ ) и фазой волны на фиксированной высоте  $h_0$  (в нашем случае для  $\lambda_1$  она равна  $90^\circ$ , а для  $\lambda_2$  она равна  $180^\circ$ ) с ростом величины  $\lambda$  растет. Так, на рис.1 для  $\lambda_1$  эта разность равна  $360^\circ-90^\circ=270^\circ$ , а для  $\lambda_2$  она равна  $360^\circ-180^\circ=180^\circ$ . По сути эта разность фаз представляет собой фазу звуковой волны, которую она имела на момент времени  $t=\Delta t_{cmp}$  на фиксированной высоте  $h_0$ . Это следует из выражения (1), где представлено известное [5] выражение для фазы звуковой волны:

$$\varphi_{\text{в}} = \frac{2\pi}{T} \Delta t - \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R. \quad (1)$$

Здесь  $\frac{2\pi}{T} \Delta t$  – фаза временных колебаний звуковой волны в момент времени  $\Delta t$ , спустя после ее излучения,  $\frac{2\pi}{\lambda} \Delta R$  – фаза пространственных колебаний звуковой волны на расстоянии  $\Delta R$  от источника излучения на этот момент времени.

Из рис.1 и выражения (1) следует, что: 1) пространственная фаза звуковой волны, определяемая выражением  $\frac{2\pi}{\lambda} \Delta R$ , на каждой высоте в данный фиксированный момент времени зависит только от величины  $\lambda$ ; 2) начальная фаза временных колебаний рассеянной с каждой

фиксированной высоты звуковой волны определяется только пространственной фазой звуковой волны, которую она имела на этой высоте  $h$  в данный фиксированный момент времени  $\Delta t_{cmp}$ .

Следовательно, измеряя начальную фазу временных колебаний принятой с фиксированного расстояния  $R$  звуковой волны в фиксированный момент времени  $t = \Delta t_{cmp}$  после излучения звуковой волны и измеряя фазу временных колебаний излученной звуковой волны, которую она имела на момент времени  $t = \Delta t_{cmp}$ , мы сможем затем из выражения (1) вычислить значение  $\lambda$ . А так как величина  $\lambda$  связана со скоростью звуковой волны  $c$  известным соотношением  $c = \frac{\lambda}{T}$ , а скорость звуковой волны связана, в свою очередь, с температурой атмосферы  $T$  соотношением  $c = 20\sqrt{T}$ , то, в конечном счете, по измеряемой начальной фазе временных колебаний принятой звуковой волны мы сможем определять таким образом для каждого направления зондирования температуру атмосферы вдоль пути распространения звуковой волны для фиксированных и одинаковых для обоих направлений величин  $\Delta t$  и  $\Delta R$ .

Используя описанную выше методику, нами была предпринята попытка экспериментально оценить анизотропию температуры атмосферы в ПАС с помощью акустического зондирования. В эксперименте использовался специально разработанный акустический локаатор [6], предназначенный для измерения фазовых характеристик акустических эхо-сигналов. В состав акустического локаатора входит: излучатель пакетов акустических волн на частоте  $\sim 1$ кГц, приемное устройство, умножитель частоты принятых сигналов в 32 раза, импульсный цифровой фазометр, имеющий на выходе ЭВМ и стрелочный индикатор. На этом акустическом локааторе в течение ряда лет с 1995 г. по 2001г. эпизодически в различное время года и при различных погодных условиях, в основном в дневное время суток, проводились измерения фазы акустических эхо-сигналов одновременно в двух различных по углу места направлениях:  $\beta_1 = 90^\circ$  и  $\beta_2 = 70^\circ$ . Применялась следующая методика измерений. Поочередно в двух различных по углу места направлениях (см. рис. 2) по 6 минут в каждом направлении (при

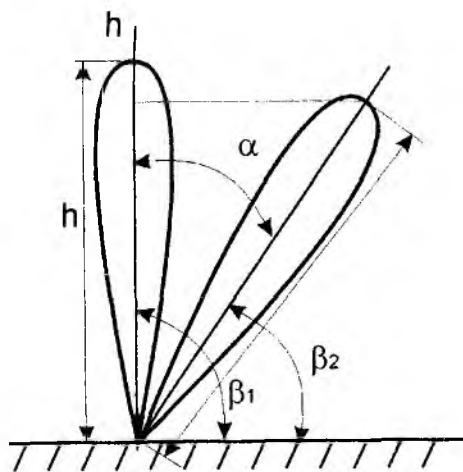


Рис. 2

частоте звуковых посылок  $\frac{1}{2c}$ ) через каждые 0,3с спустя после каждого излучения пакета акустических волн, что соответствовало высоте  $\sim 50$ м или дальности, проходимой звуковой волной до рассеивающего объема туда и обратно  $R \sim 100$ м, производилось измерение фазы принятой звуковой волны для каждого направления. Измерение фазы принятой звуковой волны производилось путем измерения фазового сдвига между фазой временных колебаний излучаемой звуковой волны, которую они имели на момент времени  $t = \Delta t_{cmp}$ , и начальной фазой временных колебаний принятой на этот момент времени звуковой волны. Достигалось это тем, что на фазометр одновременно на два входа его подавались электрические колеба-

ния, полученные в результате преобразования принятых с расстояния  $R$  колебаний звуковой волны в электрические колебания, и электрические колебания, из которых формируются излучаемые звуковые волны. Таким образом, фазометр измерял фазовый сдвиг между фазой электрических колебаний, полученных в результате преобразования принятой с расстояния  $R$  звуковой волны в электрические колебания, и фазой электрических колебаний, из которых формируются излучаемые звуковые колебания, которую они имели на момент времени  $t = \Delta t_{cmp}$ .

Измеренный таким образом фазовый сдвиг и есть фаза звуковой волны  $\varphi_{зв}$  в момент времени  $\Delta t$  на расстоянии  $R$  от источника излучения. Отметим, что электрические колебания как для принятой звуковой волны, так и для излученной, прежде чем их подать на фазометр, умножались в 32 раза. В результате этого фазометр, для каждого направления измерял умноженную в 32 раза фазу принятой звуковой волны, что повышало чувствительность локатора к фазовым изменениям соответственно в 32 раза.

При измерениях фиксирование дальности для каждого направления производилось за счет стробирования по времени  $\Delta t_{cmp}$ . Дальность в этом случае фиксировалась как  $R_1 = c_1 \Delta t_{cmp}$  и  $R_2 = c_2 \Delta t_{cmp}$ . Естественно, при сравнении звуковых волн с разными скоростями, т.к.  $c_1 \neq c_2$ , равенство величин  $R_1$  и  $R_2$  не выполнялось. Это приводило к ошибке в оценке относительной величины  $\Delta c$  между значениями  $c_1$  и  $c_2$  за счет того, что измерительный строб фазометра не полностью совпадал по дальности для двух величин  $c_1$  и  $c_2$ .

При измерении фазы фазометром использовался измерительный строб, равный 0,033 с; в течение этого времени фазометр измерял фазу для каждого колебания умноженной частоты, а затем усреднял ее величину для всего измерительного строба, равного 0,033 с. Естественно, измерительный строб фазометра не полностью совпадал по дальности для различных скоростей звуковых волн. Все это могло приводить к ошибке в оценке разности фаз, а следовательно, и в оценке разности температур для двух различных величин  $c$ . В [4] рассмотрены ошибки, связанные с заменой стробирования по дальности на стробирование по времени. В [4] показано, что такая замена приводит к систематической ошибке измеряемых относительных температур для двух направлений, причем в сторону занижения разности температур. Эта ошибка с уменьшением разности измеряемых скоростей звуковых волн  $\Delta c$  уменьшается, причем ее можно учесть для измеренных значений разностей фаз двух величин  $c$ . Согласно [4], при разности измеряемых скоростей звуковых волн  $\Delta c \leq 0,015$  м/с, что соответствует разности начальных фаз  $\varphi \leq 10^\circ$ , ее можно не учитывать, т.к. она близка нулю.

В [4] проанализированы другие возможные факторы, способные повлиять на точность и достоверность полученных данных с помощью рассмотренного здесь способа. Это и влияние доплеровских сдвигов частоты на фазовые характеристики принятых эхо-сигналов, и влияние высотных градиентов температуры на измеряемую разность температур для двух углов места.

Как следует из выполненного в [4] графического анализа, анализа на лабораторном макете и анализа на реальных эхо-сигналах, влияние эффекта Доплера на измеренные относительные изменения фаз звуковых волн ( $\varphi_s$ ) для двух направлений практически не сказывается и может не учитываться в экспериментах при измерении относительных изменений температур фазовым способом. Как отмечается в [4], эффект Доплера может приводить лишь к незначительному завышению измеряемой величины начальных фаз звуковых волн, однако эта величина практически не зависит от частоты Доплера, по крайней мере, для реально наблюдаемого на практике диапазона частот Доплера и не влияет на величину разницы фаз, измеренных для двух направлений.

Что касается влияния высотных градиентов температуры на измеряемую для двух углов места температур, то в [4] показано, что это влияние проявляется так, что при положительном градиенте температуры (когда температура с высотой падает) влияние высотного градиента на измеряемую в наклонном направлении температуру проявляется таким образом, что

она под влиянием высотного градиента температуры завышается, а при отрицательном высотном градиенте температуры (когда температура с высотой растет) она занижается.

Следовательно, для учета влияния высотных градиентов температуры на измеренную таким способом разность температур необходимо одновременно с такими измерениями вести измерения высотного градиента температуры на этих высотах.

Оценка относительного различия температур для двух направлений зондирования по величине измеренных фаз звуковых волн  $\varphi_{1\beta}$  и  $\varphi_{2\beta}$  производилась из соотношения (2):

$$\varphi_{3\beta_1} - \varphi_{3\beta_2} = \frac{2\pi R}{T} \left( \frac{1}{c_{\beta_1}} - \frac{1}{c_{\beta_2}} \right). \quad (2)$$

При этом одна из величин  $c_{\beta_1}$  или  $c_{\beta_2}$  принималась известной.

## 2. Результаты

На рис. 3-9 представлены временные зависимости измеренных по рассмотренной выше методике одновременно фаз акустических эхо-сигналов для двух различных по углу места направлений:  $\beta_1 = 90^\circ$  и  $\beta_2 = 70^\circ$ . Поскольку, как было показано при описании методики измерений, представленные на графиках величины измеренных фаз пропорциональны средней температуре атмосферы вдоль пути распространения звуковых волн, то по сути на представленных графиках мы наблюдаем временные зависимости температуры, измеренной одновременно для двух углов зондирования. Здесь представлены не все полученные нами результаты измерений, а лишь отдельные наиболее характерные зависимости.

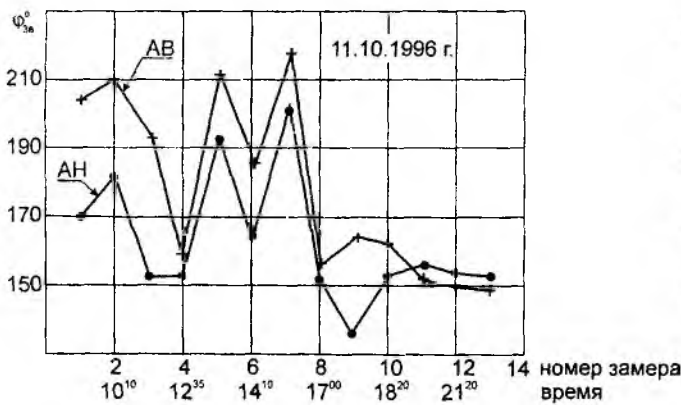


Рис. 3

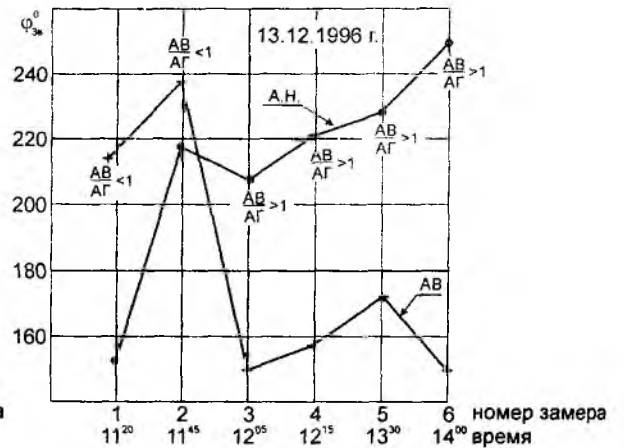


Рис. 4

На некоторых графиках, например рис. 4 и рис. 9, представлены величины отношений амплитуды акустического эхо-сигнала для вертикального направления ( $AB$ ) к амплитуде акустического эхо-сигнала для наклонного направления ( $AH$ ), которые измерялись одновременно при измерении фаз акустических эхо-сигналов. Обращает на себя внимание факт хорошей корреляции между знаком отношений  $\frac{AB}{AH}$  и знаком отношений фаз, измеренных одновременно для двух направлений. Всегда величине  $\frac{AB}{AH} > 1$  соответствует большее значение фазы, измеренной для наклонного зондирования, а величине  $\frac{AB}{AH} < 1$  соответствует меньшее значение фазы, измеренной для наклонного зондирования.

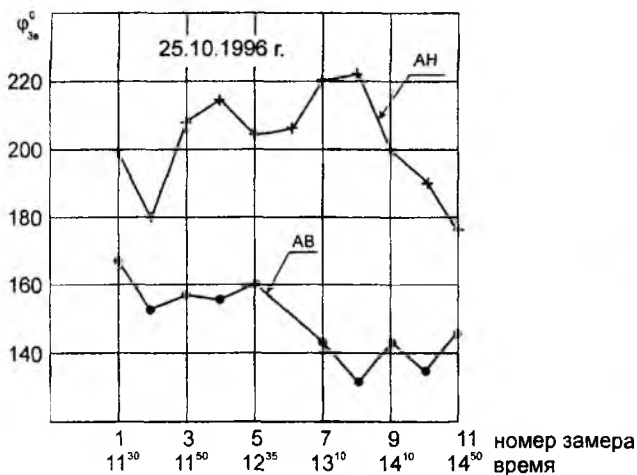


Рис. 5

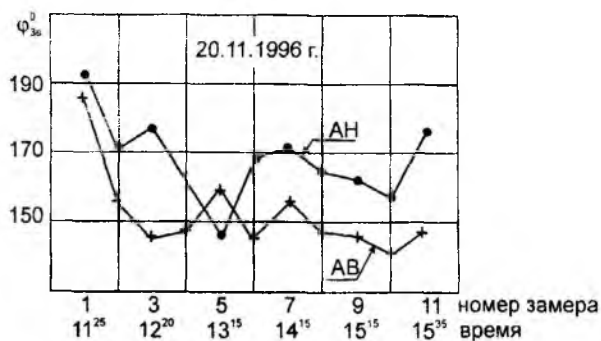


Рис. 6

Анализ полученных нами результатов показал, что почти для всех временных зависимостей полученных таким образом фаз акустических эхо-сигналов одновременно для двух углов зондирования наблюдается их устойчивое различие, максимальная величина которого составляет  $\sim 90^\circ$  для умноженной в 32 раза частоты сигнала или  $\sim 3^\circ$  для неумноженной частоты. Для большинства полученных таким образом временных зависимостей одновременно для двух направлений эти зависимости носят плавный характер. Причем наблюдаются как синфазные (рис.3), так и противофазные изменения (рис.4, 7). Также наблюдаются случаи,

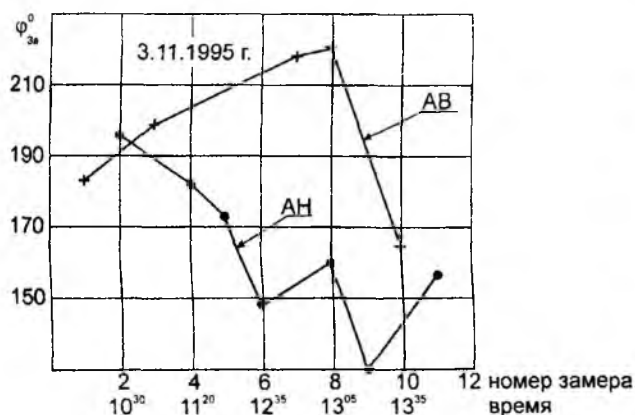


Рис. 7

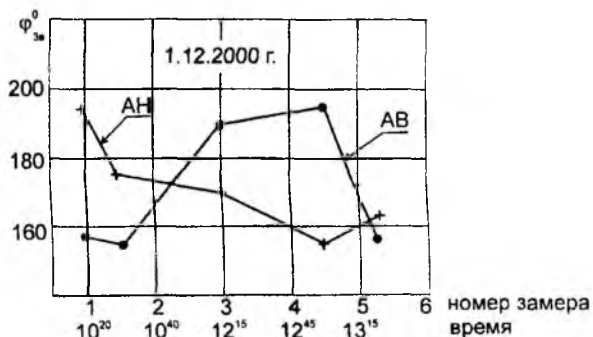


Рис. 8

когда величина  $\varphi_3$ , измеренная для вертикального направления, бывает больше, чем для наклонного направления (например, рис. 7-9), а бывает и наоборот, когда величина  $\varphi_3$  оказывается меньше для вертикального направления по сравнению с наклонным (например, рис. 4, 5). Все это позволяет заключить, что наблюдаемые различия величин фаз  $\varphi_3$ , измеренных одновременно для двух углов зондирования, а также их временные зависимости, носят не случайный характер, а обусловлены какой-то общей причиной.

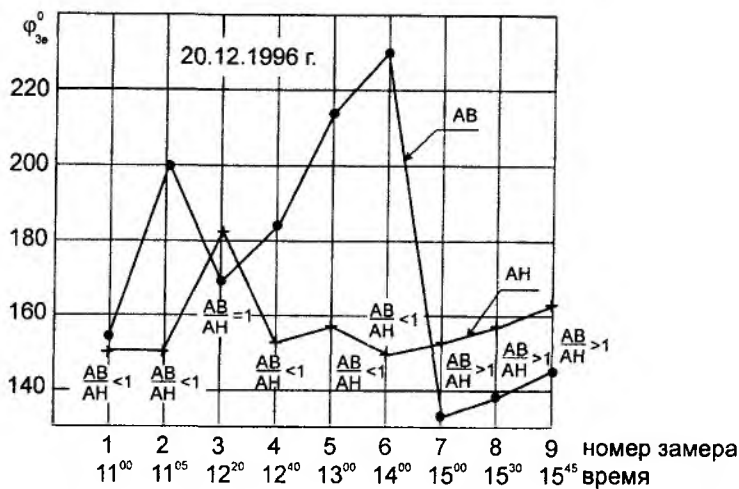


Рис. 9

Как правило, временные изменения измеренных фаз для двух направлений взаимно связаны, т.е. если, например, для одного направления величина  $\varphi_3$  со временем растет, то для другого направления обычно величина  $\varphi_3$  в это время падает, или бывает наоборот. Обращает на себя внимание еще и такой факт в полученных данных – это изменение знака во временных зависимостях величин  $\varphi_3$ , измеренных одновременно для двух углов места, в течение суток и от суток к суткам, которое определенным образом привязано либо к погодным условиям, либо ко времени суток.

### 3. Обсуждение результатов

Итак, полученные нами экспериментальные данные свидетельствуют о факте существования устойчивого различия фаз звуковых волн ( $\varphi_3$ ), измеренных одновременно в двух различных по углу места направлениях для фиксированного расстояния  $\Delta R \approx 100$  м и для фиксированного времени после излучения пакета звуковых волн  $\Delta t = 0,3$  с.

Попытаемся оценить, с чем связано наблюдаемое явление: с методическим эффектом или анизотропией температуры в ПАС.

Рассмотрим возможные причины методического характера, которые могли бы привести к наблюдаемому эффекту различия фаз акустических эхо-сигналов, измеренных одновременно для двух различных по углу места направлений.

Одной из таких причин могла явиться замена стробирования по высоте на стробирование по времени, что могло привести за счет неполного совпадения измерительных стробов по дальности к наблюдаемому эффекту. Однако, как показано в [4], этот фактор, во-первых, приводит к занижению наблюдаемого различия фаз для двух направлений, во-вторых, этот фактор проявляется в виде систематической ошибки и притом с уменьшением разницы скоростей для сравниваемых двух звуковых волн уменьшается. В [4] показано, что разницу скоростей  $\Delta c \leq 0,015$  м/с, что соответствует разности начальных фаз  $\varphi \leq 10^\circ$ , можно не учитывать, т.к. она близка нулю. Напомним, что у нас разность измеренных в экспериментах фаз для двух направлений не превышает  $\sim 3^\circ$ , так что наблюдаемый эффект различия скоростей не может быть вызван этим фактором.

Следующим фактором, способным вызвать каким-то образом наблюдаемый эффект, может быть эффект Доплера. Дело в том, что при акустическом зондировании атмосферы рассеивающие звук температурные неоднородности атмосферы перемещаются под действием ветра, что неизбежно приведет к доплеровским сдвигам частоты и, естественно, к изменению фазовых характеристик эхо-сигналов и, в конечном счете, к изменению относительных температур, измеренных в зависимости от угла места. Однако выполненный в [4] графический

анализ, анализы на лабораторном макете и на реальных сигналах показали, что влияние эффекта Доплера на измеренных относительных разностях фаз звуковых волн  $\varphi_3$  для двух направлений практически не сказывается и не может привести к наблюдаемому эффекту. Как отмечается в [4], эффект Доплера может привести лишь к незначительному завышению измеряемых величин фаз эхо-сигналов для каждого направления, не влияя на разность фаз между ними.

И, наконец, рассмотрим последний фактор, способный повлиять на измеренные относительные изменения температуры в зависимости от угла места ( $\beta$ ). Это высотный градиент температуры.

В [4] показано, что наличие высотного градиента температуры сказывается на результатах измеренных фазовым способом относительных изменений температуры в зависимости от угла места ( $\beta$ ) таким образом, что уменьшает ожидаемый эффект анизотропии температуры атмосферы и не может явиться причиной наблюдаемого эффекта различия в зависимости от угла места. Дело в том, что при наклонном зондировании, как это следует из рис.2, высота зондирования по сравнению с вертикальным направлением уменьшается в  $\cos\alpha$  раз (см. рис. 2). Это, естественно, приведет при наличии высотного градиента температуры к тому, что среднее значение температуры для всей дальности  $R$  для двух направлений будет различным. Так, при уменьшении температуры с высотой среднее значение температуры для наклонного зондирования всегда будет больше, чем для вертикального, так как при одинаковой дальности при вертикальном направлении на конце пути зондирования всегда при таком высотном градиенте температуры температура будет меньше (поскольку температура при таком градиенте падает с высотой), чем на конце пути ( $R$ ) при наклонном зондировании (так как при наклонном зондировании высота конца точки отражения ( $R$ ) понижается при сохранении неизменной величины  $R$ , то это приведет к тому, что средняя для всего пути  $R$  температура при наклонном зондировании в этом случае будет больше, чем при вертикальном.)

Таким образом, при сравнении температур, полученных данным способом для двух углов места ( $\beta$ ), нужно иметь в виду, что измеренная для наклонного направления температура при положительных градиентах (т.е. когда температура падает с высотой) за счет влияния высотного градиента температуры всегда будет завышена, а для отрицательных градиентов температуры (когда температура растет с высотой) измеренная величина температуры для наклонного направления (зондирования) всегда будет занижена.

Таким образом, при сравнении температур, измеренных одновременно в двух различных по углу места направлениях, наличие высотного градиента температуры неизбежно приводит к тому, что измеренное различие температур будет занижено и, следовательно, этот фактор не может явиться причиной наблюдаемого у нас эффекта различия температур, измеренных при одновременном зондировании в двух различных по углу места направлениях.

Итак, рассмотренные здесь факторы, способные вызвать наблюдаемый в наших экспериментах эффект, не являются причиной его и, следовательно, причиной наблюдаемого в наших экспериментах эффекта различия фаз  $\varphi_3$  звуковых волн, измеренных одновременно в двух различных по углу места направлениях, может быть анизотропия температуры (хаотической скорости молекул), связанная с температурной стратификацией атмосферы. Если принять такое предположение, то можно попытаться оценить на основании полученных нами данных разницу температур для вертикального и горизонтального направлений. Для этого сначала учтем влияние высотного градиента температуры на полученные нами данные хотя бы в общем оценочно, поскольку в период измерений по техническим причинам высотный градиент температуры не измерялся.

Рассмотрим сначала влияние высотного градиента температуры на измеренную нами разность температур в двух направлениях для случая неустойчивой и конвективной стратификации, ибо этот тип стратификации в наших экспериментах определялся наиболее достоверно. Согласно [2], высотный градиент температуры для такого случая стратификации характеризуется падением температуры с высотой от  $1^{\circ}$  до  $6^{\circ}$  на 100 м. Оценим для среднего

значения величины таких градиентов  $\sim 3^{\circ}/100\text{м}$ . Поскольку наши экспериментальные данные получены для углов зондирования  $\beta_1=90^{\circ}$  и  $\beta_2=70^{\circ}$ , то при зондировании в направлении  $\beta_2=70^{\circ}$  высота зондирования уменьшится в  $\cos 20^{\circ}$  раз и станет вместо  $\sim 50$  м, которую она имела для углов  $\beta=90^{\circ}$ ,  $\sim 47$  м. В этом случае при вертикальном градиенте температуры  $3^{\circ}/100\text{м}$  для вертикального направления на высоте  $h=50$  м температура уменьшится по сравнению с температурой у поверхности Земли на  $1,5^{\circ}$  (так, например, если у поверхности Земли температура была  $8^{\circ}\text{C}$ , то на высоте  $h=50$  м она будет  $8^{\circ}-1,5^{\circ}=6,5^{\circ}$ , а ее среднее значение для всей дальности (высоты)  $=50$  м будет равно  $(8^{\circ}+6,5^{\circ})/2=7,25^{\circ}\text{C}$ . Для наклонного зондирования среднее значение температуры увеличится за счет того, что высота уменьшится на  $3\text{м}$  и станет вместо  $6,5^{\circ}$  на высоте  $50$  м  $\sim 6,6^{\circ}$  на высоте  $47$  м. Среднее значение температуры в этом случае вдоль пути зондирования увеличится и станет  $(8^{\circ}+6,6^{\circ})/2=7,3^{\circ}$  вместо  $7,25^{\circ}$  для высоты  $h=50$  м. Следовательно, измеренное значение температуры для наклонного зондирования в данном случае будет завышено на  $\sim 0,05^{\circ}$  по сравнению с вертикальным направлением и поэтому истинное значение разности температур для двух углов зондирования  $\beta_1$  и  $\beta_2$  будет занижено соответственно на  $0,05^{\circ}$ .

Выполненная нами оценка с помощью выражения (2) разности температур для максимально наблюдаемого в экспериментах различия фаз при зондировании в двух различных по углу места направлениях  $\beta_1=90^{\circ}$  и  $\beta_2=70^{\circ}$   $\Delta\varphi \approx 3^{\circ}$  дает величину различия температур для этого значения  $\Delta\varphi = 3^{\circ} \quad T \approx 0,01^{\circ}$ . (Заметим, что контроль однозначности фаз для каждого направления при измерениях не производился). С учетом влияния высотного градиента температуры эта величина должна быть увеличена на  $0,05^{\circ}$  и истинное ее значение должно составить  $\sim 0,06^{\circ}$  при различии углов зондирования в  $\sim 20^{\circ}$ .

Для устойчивой стратификации картина будет выглядеть наоборот (так как температура атмосферы в этом случае растет с высотой, то это приведет к тому, что в наклонном направлении измеренное значение температуры будет занижено).

Таким образом, найденная нами максимальная разница температур по представленным на рисунках временным зависимостям  $\varphi_z$ , полученным для двух углов зондирования, отличающихся на  $\sim 20^{\circ}$ , будет составлять  $\sim 0,06^{\circ}$ .

Оценив разницу температур для двух углов зондирования (в вертикальном направлении и отличном от вертикального направления всего на  $\sim 20^{\circ}$ ), попытаемся теперь оценить разницу температур между вертикальным и горизонтальным направлениями, используя методику [7]. Выполненная с помощью методики [7] оценка показала, что для неустойчивой стратификации в вертикальном направлении температура в ПАС больше, чем в горизонтальном, всего лишь на  $\sim 0,5^{\circ}$ . Однако это весьма приблизительная оценка, позволяющая судить лишь о порядке величины этого эффекта. Дело в том, что в период почти всех наших экспериментов тип температурной стратификации определялся по соотношению амплитуд акустических эхо-сигналов, принятых для каждого направления зондирования, и лишь в одном эксперименте 2.06.1999 г. одновременно с амплитудным методом применялся известный метод [8] оценки типа температурной стратификации по величине пульсационной скорости. Таким образом, в период этого эксперимента оценка типа стратификации была наиболее надежной. По соотношению величин пульсационной скорости ветра, измеренных в двух направлениях, согласно [8], на этот момент измерений температурную стратификацию можно было отнести к неустойчивой стратификации. На этот момент измерений амплитуда эхо-сигналов для вертикального направления оказалась значительно меньше, чем для наклонного. Таким образом, на основании этого эксперимента мы могли отнести те измерения, для которых выполнялось такое соотношение амплитуд акустических эхо-сигналов, к неустойчивому типу температурной стратификации. Таким образом, представленные здесь оценки для неустойчивого типа стратификации атмосферы и сделанные выводы на основании их являются в определенной степени достоверными, хотя количественные оценки являются весьма приближенными, по-

сколькx на период измерений не проводилось измерений высотных градиентов температуры.

Сравним представленные нами здесь экспериментальные данные относительно оценки анизотропии температуры атмосферы в ПАС с данными, полученными ранее в [1] для высот (~95 км).

Оценку анизотропии температуры по представленным здесь экспериментальным данным мы произвели для неустойчивой стратификации и для высот ~50 м. В этом случае оказалось, что температура для двух направлений (вертикального и горизонтального) отличается всего лишь на  $0,5^{\circ}$ . Для вертикального направления она оказалась больше. Оценка анизотропии температуры в [1] выполнена по данным радионаблюдения метеорных следов для высот ~95 км. Эти данные, как отмечалось выше, можно отнести к устойчивому типу стратификации, поскольку, во-первых, основная численность наблюдаемых метеоров относятся к высоте 95 км, где, согласно [2], наблюдается быстрый рост температуры с высотой, во-вторых, основная численность радиометеоров, использованных при анализе в [1], приходится на ночные и утренние часы, т.е. на то время, когда, согласно [2], на этих высотах можно ожидать устойчивую стратификацию. Поэтому и температура атмосферы, согласно оценкам [1], в горизонтальном направлении оказалась больше, чем в вертикальном.

Таким образом, полученные нами данные для высот ~50 м и данные [1] для высот 95 км качественно находятся в удовлетворительном согласии с гипотезой [1] о возможности существования анизотропии молекулярных процессов в атмосфере Земли, связанной с температурной стратификацией атмосферы.

Что касается количественного различия эффекта анизотропии температуры, полученной для двух существенно отличающихся высот, то оно не лишено здравого смысла, если учесть существенное различие плотностей атмосферы на этих высотах.

## 5. Выводы

На основании полученных с помощью акустического зондирования ПАС экспериментальных данных по одновременному измерению фазы звуковой волны в двух различных по углу места направлениях можно сделать следующие выводы:

1. Измеренные одновременно в двух различных по углу места направлениях (в вертикальном и под углом  $\sim 20^{\circ}$  от вертикали) начальные фазы временных колебаний принятой звуковой волны для фиксированного времени и фиксированной высоты существенно отличаются, причем это различие фаз по величине и по знаку меняется в течение суток, а также от погодных условий.

2. Анализ возможных причин наблюдаемого различия фаз принятых звуковых волн одновременно в двух различных по углу места направлениях позволяет допустить, что наблюдаемое различие фаз звуковых волн может быть связано с анизотропией температуры атмосферы (хаотической скоростью молекул), обусловленной температурной стратификацией атмосферы.

3. Полученные данные оценки анизотропии температуры атмосферы для ПАС качественно находятся в удовлетворительном согласии с полученной ранее [1] оценкой анизотропии хаотической скорости молекул и длины свободного пробега молекул для высот ~95 км, выполненной с помощью радионаблюдения метеорных следов.

Однако полученные данные и сделанные здесь на основании их выводы являются предварительными, поскольку не все наблюдаемые в экспериментах факты до конца осознаны и требуют дополнительных тонких исследований. К тому же, имеющиеся в настоящее время в литературе некоторые результаты экспериментальных исследований связи между фазой акустического эхо-сигнала и температурой атмосферы [9-11] весьма противоречивы, что вызывает необходимость, в свою очередь, разностороннего исследования этого вопроса с тем, чтобы отследить истину до конца.

**Список литературы:** 1. Делов И.А. Анизотропия параметров ионизованного метеорного следа, связанных с молекулярными процессами в атмосфере. Изв. АН СССР. Геомагнетизм и аэрономия. 1966, Т.26, №2. С.265-268. 2. Матвеев Л.Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеорол. изд-во, 1965. 876 с. 3. Монин А.С. О влиянии температурной стратификации среды на турбулентность // Труды междунар. коллоквиума "Атмосферная турбулентность и распространение радиоволн". М: Наука, 1967.С. 113-119. 4. Делов И.А., Сліпченко М.І. Спосіб дистанційного вимірювання відносних змін типу температури повітря за допомогою акустичного зондування атмосфери. Заявка №2001085538 від 03.08.2001. 5. Савельев И.В. Курс общей физики. М. Наука, 1973. 511 с. 6. Бабкин С.И., Груша Т.В., Делов И.А. К использованию акустической релаксации для измерения влажности воздуха // Тезисы доклада 2-й Междунар. конф. «Теория и техника передачи, приема и обработки информации» (17-19 сентября 1996 г.). Часть II. 1996. Харьков-Туапсе, С. 56-58. 7. Делов И.А.. Результаты оценки анизотропии параметров атмосферы дистанционным зондированием. Харьков: Харьк. ин-т радиоэлектроники, 1987. 18 с. Деп. в Укр НИИНТИ 04.05.87, № 1354-УК-87. 8. Hand H. Acoustic sounder data as meteorological input in dispersion estimates. "Airpollut Modeling and Appl". Pra 13th Int Techn. Meet., He des Embilz., 14-17 Sept., 1982, NewYork, London, 1984, 425-437. Dvecuss, 438 (anri). 9. Closs R. Land Surridge A.D. The temperature profile in the lower atmosphere obtained by acoustic sounding. J.Phys E: Sci Intr., 7, P. 369-371, 1974. 10. Surridge A.D. On a phase sensitive acoustic sounder. J. Atmos. Terres. Phys., 49, P.105-110, 1978. 11. Braoley S.G., Hipkin V.J. and Underwood K. The relationship between the phase of a sodar signal and atmospheric temperature //Proc. 10<sup>th</sup> Intern. Sympos. On Acoustic Remote Sensing and Associated Techniques of the Atmosphere and Oceans Auckland 2000, New Zealand, P.13-18.

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 04.12.2001