

СИГНАЛЫ, ИХ ФОРМИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА

УДК 550 388.2

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АНИЗОТРОПИИ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ПРОЦЕССОВ АТМОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

И.А. ДЕЛОВ, Н.И. СЛИПЧЕНКО

Представлены результаты экспериментальной проверки заявленной ранее гипотезы о возможности существования в атмосфере Земли анизотропии молекулярных процессов, связанной с температурной стратификацией атмосферы. Эксперименты проводились в пограничном атмосферном слое Земли с помощью акустического зондирования одновременно в нескольких различных по углу места направлениях. Использовался фазовый способ. Анализ полученных многочисленных экспериментальных данных позволяет заключить о возможности существования в пограничном атмосферном слое Земли анизотропии хаотической скорости молекул, что удовлетворительно согласуется с высказанной ранее гипотезой.

The experimental test results of the earlier claimed hypothesis about the possibility of existence of molecular processes anisotropy in the Earth's atmosphere connected with the atmosphere temperature stratification are presented. The experiments were performed in the Earth's boundary layer by using acoustic sounding simultaneously in several directions different in the angle. The phase method was used. The analysis of the numerous experimental data obtained makes it possible to draw a conclusion about the possibility of existence of molecule random velocity anisotropy in the Earth's boundary layer, which satisfactorily agrees with the earlier suggested hypothesis.

ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящей работы являлась проверка заявленной ранее [1] гипотезы о возможности существования в атмосфере Земли анизотропии молекулярных процессов, связанной с температурной стратификацией атмосферы. Гипотеза [1] была сформулирована на основании экспериментальных данных, полученных в результате радионаблюдений ионизированных метеорных следов. Полученные многочисленные экспериментальные данные в [1] свидетельствовали о существовании явно выраженной анизотропии двух параметров ионизированного метеорного следа: коэффициента амбиполярной диффузии D_a , который связан с хаотической скоростью молекул ν известным выражением [2] $D_a \sim \nu$, и начального радиуса r_0 , который связан с длиной свободного пробега молекул λ_a согласно [2] соотношением $r_0 \sim \lambda_a$.

Однако сделать однозначный вывод на основании этих данных о существовании в атмосфере Земли анизотропии молекулярных процессов, связанной с температурной стратификацией атмосферы, не представлялось возможным. Дело в том, что атмосфера на метеорных высотах (80–100 км) частично ионизирована, к тому же экспериментальные данные в [1] были получены в результате наблюдения ионизированных метеорных следов. Поэтому для того, чтобы полностью исключить влияние магнитных и электрических полей в основном неизвестного происхождения (известные магнитные и электрические поля, как показал анализ в [1], не являлись ответственными за наблюдаемый эффект), необходима была проверка гипотезы

[1] в нейтральной атмосфере, какой, например, является атмосфера в пограничном слое Земли. С этой целью был разработан фазовый способ измерения относительных изменений температуры при дистанционном акустическом зондировании атмосферы [3].

1. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Суть разработанного способа состоит в измерении фазы акустического эхо-сигнала при моностатическом акустическом зондировании одновременно в двух и более различных по углу места направлениях β [3]. При этом измерение фазы акустического эхо-сигнала для всех направлений производилось в одно и то же время Δt после излучения звуковой волны и при одной и той же дальности до отражающего объема атмосферы (R). Одинаковость дальностей для всех направлений зондирования, как показано в [3], достигается за счет близкой по величине для каждого направления зондирования скорости звуковой волны, а также за счет того, что на вход приемника одновременно поступает акустический эхо-сигнал, рассеянный целой областью дальностей (ΔR) и несущий таким образом информацию о среднем значении измеряемой фазы звуковой волны для этого диапазона дальностей (ΔR). В этом случае фаза звуковой волны φ , определяемая выражением (1),

$$\varphi = \frac{2\pi\Delta t}{T} - \frac{2\pi\Delta R}{TC} \quad (1)$$

(здесь C – скорость звука, T – период колебаний звуковой волны), будет зависеть только от скорости

звука C , а значит, от температуры атмосферы T° , поскольку скорость звука C связана с температурой атмосферы T° известным соотношением $C = 20\sqrt{T^\circ}$.

Таким образом, измеряя фазу акустического эхо-сигнала одновременно для различных по углу места направлений β , мы сможем затем на основании сравнения их между собой оценить наличие и степень анизотропии температуры атмосферы. При отсутствии анизотропии, т.е. при изотропной температуре, измеряемая фаза акустического эхо-сигнала не будет зависеть от угла зондирования β , оставаясь постоянной при изменении его.

В измерениях использовался акустический лока-тор со следующими параметрами: частота зондирования ~ 1 кГц, длительность излучаемого импульса $\tau = 70$ мс, излучаемая акустическая мощность ~ 4 Вт, антенна параболическая, коммутируемая с защитным экраном, диаметр параболоида ~ 2 м. Для измерения фазы использовался импульсный фазометр. Длительность измерительного строба составляла ~ 33 мс. Для калибровки фазометра использовался стандартный калибратор фазы. Для контроля излучаемой фазы эпизодически производилось измерение начальной фазы излучаемого акустического пакета волн и в случае необходимости производилась ее коррекция.

Первые измерения были выполнены при использовании умножения частоты акустического эхо-сигнала в 32 раза. Использовался способ [3]. Измерения проводились в двух направлениях: в вертикальном и под углом $\alpha = 22^\circ$ от вертикали, при высоте зондирования ~ 50 м. Смена направления зондирования производилась через каждые 2–3 минуты. С 1995 по 2002 гг. измерения производились эпизодически, в основном в дневное время суток при различных погодных условиях. Одновременно с фазой сигнала производилось измерение частоты Доплера, что позволяло оценить связь между временными изменениями фазы и пульсационной скоростью ветра [4, 5, 6, 7].

Полученные первые результаты свидетельствовали [4, 5, 6, 7] о существовании явно выраженной анизотропии фазы акустического эхо-сигнала, которая определенным образом изменяется в зависимости от времени, пульсационной скорости ветра и погодных условий, изменяя порой знак на обратный. В качестве иллюстрации сказанного на рис. 1 представлены временные изменения фазы эхо-сигнала, полученные для двух углов зондирования 25.10.1996 г., на рис. 2 – то же, что и на рис. 1, но для другого времени зондирования – 13.11.1995 г. Максимальная величина наблюдаемой анизотропии Φ для углов зондирования $\alpha_1 = 0$ и $\alpha = 22^\circ$ согласно [7] составляет $\sim 3^\circ$ (это для неумноженной частоты), а пересчитанная к вертикальному и горизонтальному направлению – составляет $\sim 15^\circ$, т.е. разница температур для вертикального направления и горизонтального с учетом влияния вертикального градиента температуры согласно [7] составляет всего $\sim 3^\circ$.

Однако умножение частоты эхо-сигнала в 32 раза существенно ограничивало диапазон измеряемой ани-

зотропии из-за неоднозначности измеряемой фазы при ее значениях больше 360° .

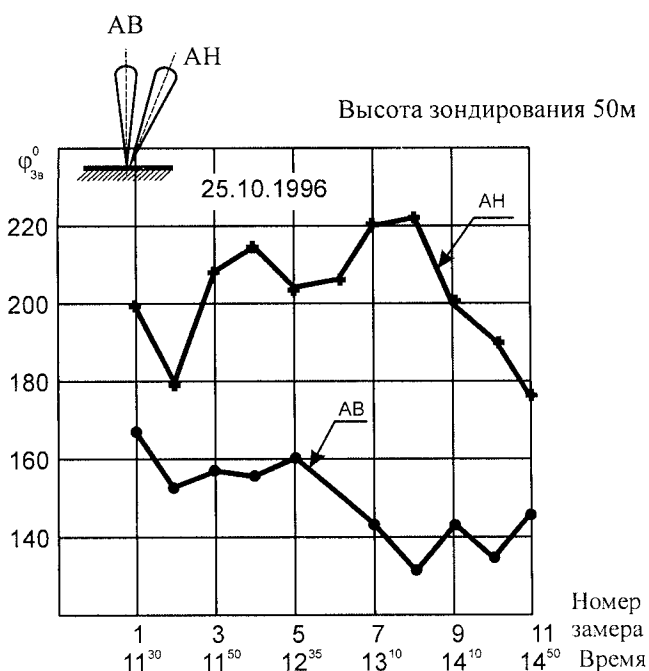


Рис. 1. Зависимость фазы акустического эхо-сигнала от времени для двух углов зондирования:

$$(AB) - \beta_1 = 90^\circ, (AH) - \beta_2 = 70^\circ$$

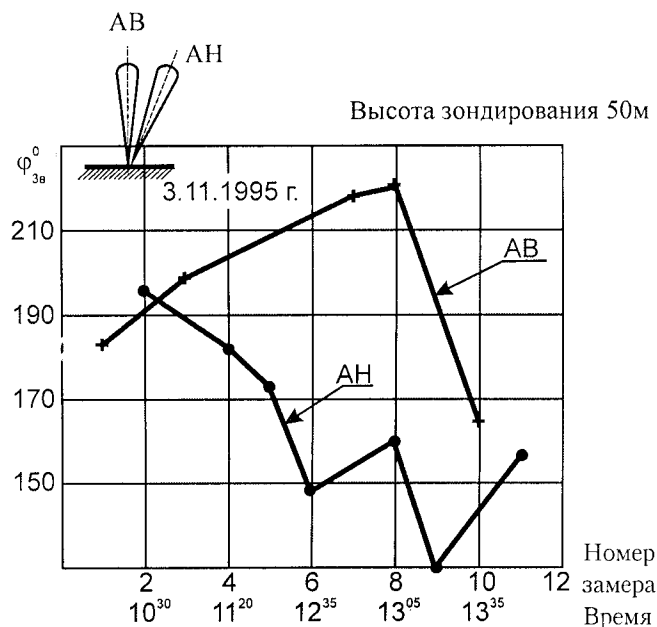


Рис. 2. Зависимость фазы акустического эхо-сигнала от времени для двух углов зондирования:

$$(AB) - \beta_1 = 90^\circ, \beta_2 = 70^\circ$$

Поэтому в дальнейшем измерения проводились без умножения частоты, т.е. на частоте зондирования (~ 1 кГц). Использовался новый способ [8]. При умножении частоты акустического эхо-сигнала в 32 раза влияние эффекта Доплера не сказывалось на измерении относительных изменений температуры атмосферы в двух направлениях. Это связано с тем,

что систематическая ошибка за счет влияния эффекта Доплера на измеряемую фазу не зависела от частоты Доплера, была одинаковой для всех направлений и потому не проявлялась при получении относительных изменений фазы (температуры) в зависимости от направления зондирования. При использовании способа [8], без умножения частоты, влияние эффекта Доплера при измерении фазы эхо-сигнала необходимо было учитывать. С этой целью при измерении фазы акустического сигнала одновременно измерялась частота Доплера и затем вводились поправки в измеренное значение фазы. Учет влияния эффекта Доплера на измеряемую величину фазы производился в соответствии с [8] по формуле:

$$\Delta\varphi_2 = \frac{\Delta T \cdot 360^\circ \Delta t_{\text{стр}}}{2T} \quad (2)$$

Здесь T – период излучаемой частоты звуковых колебаний, ΔT – разность между периодом излучаемых колебаний и периодом принятых колебаний, $\Delta t_{\text{стр}}$ – длительность измерительного строба.

Используя эту методику, проводились систематические измерения анизотропии фазы с декабря 2002 г. по декабрь 2003 г. по 2–3 дня каждой недели месяца при различных погодных условиях в основном в дневное время суток. Измерения, как правило, проводились при зондировании до высоты ~ 50 м. Сначала измерения проводились в двух направлениях (в вертикальном направлении и под углом $\alpha = 22^\circ$ от вертикали). Потом измерения проводились в трех направ-

лениях (в вертикальном и под углом $\alpha = 22^\circ$ от вертикали в двух противоположных по азимуту направлениях). Изменение направления зондирования производилось поочередно через каждые 2–3 минуты.

Качественные калибровки акустического локатора с целью определения связи между показаниями фазометра и изменениями температуры атмосферы были нами выполнены в [9].

Получен обширный экспериментальный материал, анализ которого свидетельствует о существовании явно выраженной анизотропии фазы акустического эхо-сигнала, которая так же, как и в случае измерений с использованием умножения частоты эхо-сигнала в 32 раза, существенно изменяется со временем и от погодных условий, изменяя порой знак на обратный. Предварительные результаты представлены в [9]. Максимальная величина наблюдаемой анизотропии фазы (в данном случае речь идет о величине разности фаз, измеренных в вертикальном направлении и под углом $\alpha = 22^\circ$ от вертикального направления) составляет $\sim 100^\circ$, что в пересчете на горизонтальное направление составляет $\sim 400^\circ$.

В качестве иллюстрации на рис. 3 представлены временные зависимости измеренной фазы для трех направлений зондирования по представленной выше методике. Измерения проводились 22.09.2003 г. при следующей погоде: ясно, небольшой ветер, $t^\circ = +8^\circ\text{C}$, ночью был мороз. Высота зондирования ~ 50 м. Результаты представлены с учетом влияния эффекта Доплера.

На рис. 4 те же результаты представлены без учета влияния эффекта Доплера на измеряемую величину

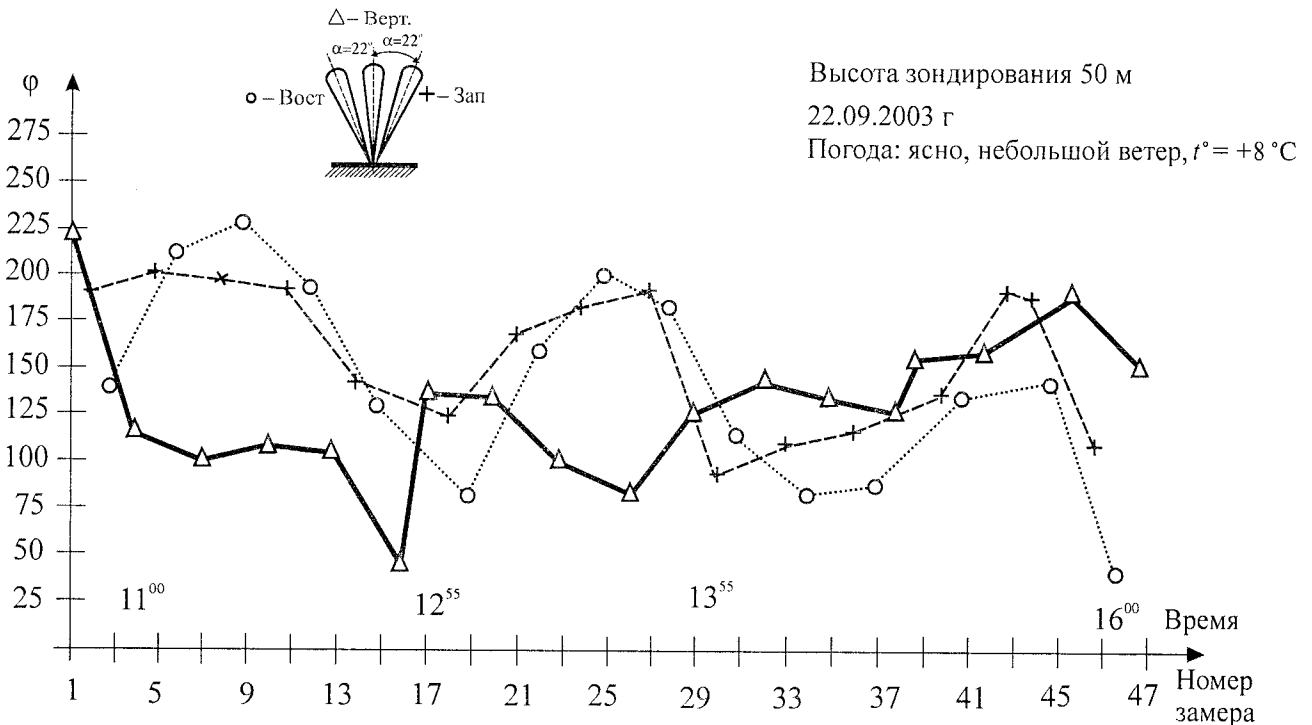


Рис. 3. Зависимость фазы акустического эхо-сигнала от времени для трех углов зондирования: Δ – для вертикального направления, $+$ – для западного направления при угле $\alpha = 22^\circ$, \circ – для восточного направления при угле $\alpha = 22^\circ$ (исправленные данные с учетом влияния эффекта Доплера)

фазы эхо-сигнала. Как следует из представленных рисунков, влияние эффекта Доплера на измеряемую величину фазы хотя и существенно, однако не является определяющим в наблюдаемом различии фаз, измеренных для разных направлений. На рис. 3 и 4 обращают на себя внимание синфазные и почти равные по величине временные изменения фазы, измеренной для двух противоположных по азимуту направлений.

На рис. 5 представлены результаты измерений 2.09.2003 г. для других погодных условий: солнечно, высокая облачность, небольшой ветер, $t^{\circ} = +30^{\circ}\text{C}$. Результаты представлены с учетом эффекта Доплера. Высота зондирования 50 м. Здесь обращает на себя внимание резкое изменение поведения фазовых характеристик с № 16. С этого момента погода резко изменилась: небо стало прозрачным, полностью стих ветер. Если с № 1 до № 15 фазовые характеристики для всех трех направлений были близки по величине, то с № 16 картина резко изменилась: фазовые характеристики для вертикального зондирования и для зондирования под углом $\alpha = 22^{\circ}$ стали существенно различными (фаза для вертикального зондирования стала существенно больше, чем для наклонного зондирования), что может быть связано с быстрым изменением температурной стратификации атмосферы.

Для того чтобы учесть влияние на измеряемую фазу эхо-сигнала других искажающих факторов, был разработан новый способ измерений температуры атмосферы при зондировании в различных по углу места направлениях [10].

Речь идет о влиянии на измеряемую фазу эхо-сигнала таких факторов, как: зашумление фазы звуковой волны отражениями от поверхности Земли [11, 12]; влияние быстрых пульсаций скорости ветра, которые могут оказываться различными при прохождении звуковой волной пути туда, до рассеивающего объема атмосферы, и обратно; влияние быстрых изменений скорости ветра со временем (рост скорости или спад ее) и другие факторы. Ведь смена направлений зондирования в наших экспериментах производилась через определенное время (2–3 минуты), за которое могли существенно измениться характеристики атмосферы (температурные и ветровые). Поэтому для того, чтобы сравнивать измеренные фазы для двух направлений, нужно быть уверенным в том, что за время смены направления зондирования состояние атмосферы не изменилось, а если изменилось, то эти изменения можно учесть.

С этой целью был разработан способ [10], позволяющий оценить степень влияния таких факторов и учесть их при измерениях фазы эхо-сигнала.

Суть этого способа состоит в измерениях фазы эхо-сигнала для двух различных значений начальных фаз излучаемых поочередно пакетов акустических волн. При этом принимается, что за время от одного излучения до последующего излучения на пути следования звуковой волны существенных изменений температуры не происходит и всякие изменения фазы звуковой волны за этот период будут вызваны только искажающими факторами.

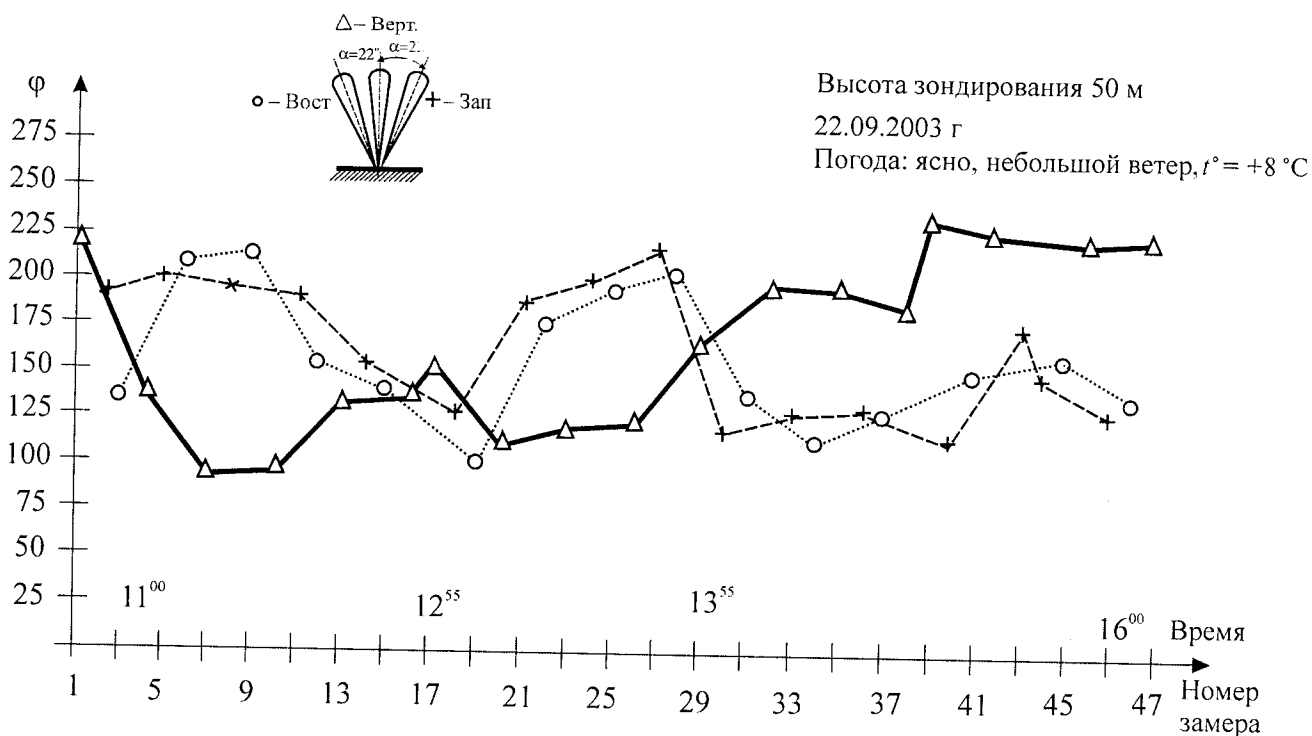


Рис. 4. Зависимость фазы акустического эхо-сигнала от времени для трех углов зондирования: Δ – для вертикального направления, $+$ – для западного направления при угле $\alpha = 22^{\circ}$, O – для восточного направления при угле $\alpha = 22^{\circ}$ (результаты непосредственных измерений)

Поскольку фазу акустического эхо-сигнала мы измеряем относительно фазы опорного сигнала, то всякие искажающие фазу факторы будут проявляться либо в виде плавного увеличения или уменьшения этой разности фаз, либо в виде зашумляющих ее флуктуаций. Так, если разность последовательно излучаемых начальных фаз $\Delta\varphi_{из} = \varphi_{н1} - \varphi_{н2}$ будет равна разности фаз принятых соответственно им акустических эхо-сигналов $\Delta\varphi_{пр} = \varphi_{пр1} - \varphi_{пр2}$, то значит искажающих фазу факторов нет при прохождении звуковой волной пути от источника излучения до отражающего объема атмосферы туда и обратно. Действительно, если фаза волны эхо-сигнала для излученной волны с началь-

ной фазой $\varphi_{н1}$ равна $\varphi_{пр1} = \frac{2\pi\Delta t}{T} - \frac{2\pi\Delta R}{TC} + \varphi_{н1}$, а для излученной волны с начальной фазой $\varphi_{н2}$ равна $\varphi_{пр2} = \frac{2\pi\Delta t}{T} - \frac{2\pi\Delta R}{TC} + \varphi_{н2}$, то разность между ними будет равна $\varphi_{пр1} - \varphi_{пр2} = \varphi_{н1} - \varphi_{н2}$ (поскольку мы приняли, что выражение $\frac{2\pi\Delta t}{T} - \frac{2\pi\Delta R}{TC}$ для обоих излучений

одинаковое, т. к. $\Delta t, \Delta R, C = const$). Если же эти разности будут не равны $\varphi_{пр1} - \varphi_{пр2} \neq \varphi_{н1} - \varphi_{н2}$, то тогда для каждого измерения вводится поправка. Так, например, если разность измеренных фаз будет меньше разности начальных фаз излученных волн, то тогда к измеренному большему значению фазы прибавляется величина $\frac{1}{2}\Delta\Delta\varphi_n$, где $\Delta\Delta\varphi_n = \Delta\varphi_{пр} - \Delta\varphi_{из}$, а из мень-

шего измеренного значения вычитается величина $\frac{1}{2}\Delta\Delta\varphi_n$. Если же разность измеренных фаз будет больше разности начальных фаз излученных волн, то тогда от измеренного большего значения вычитается величина $\frac{1}{2}\Delta\Delta\varphi_n$, а к меньшему значению прибавляется величина $\frac{1}{2}\Delta\Delta\varphi_n$.

Используя описанную выше методику, нами с января 2004 г. проводятся регулярные измерения фазы эхо-сигнала в трех направлениях на высоте зондирования $\sim 50, 34$ и 85 м. Изменение начальной фазы излучаемой звуковой волны производится поочередно через 2–3 минуты для каждого направления зондирования.

Полученные многочисленные результаты свидетельствуют о том, что в ряде случаев, особенно в тихую погоду, разность измеренных начальных фаз близка разности начальных фаз излученных волн, что свидетельствует о полном отсутствии искажающих фазу волны факторов. Такая картина наблюдается для всех трех уровней зондирования: 34, 50 и 85 м. В ряде случаев, особенно при сильном порывистом ветре, разность измеренных фаз со временем уменьшается либо возрастает, что может быть связано с изменением во времени скорости ветра (с возрастанием или уменьшением ее). Наблюдаются случаи, когда разность фаз измеренных эхо-сигналов для двух различных начальных фаз бывает близка нулю.



Рис. 5. Зависимость фазы акустического эхо-сигнала от времени для трех углов зондирования: Δ – для вертикального направления, $+$ – для западного направления при угле $\alpha = 22^\circ$, O – для восточного направления при угле $\alpha = 22^\circ$ (результаты представлены с учетом влияния эффекта Доплера)

В качестве иллюстрации на рис. 6, а, б и 7, а, б представлены временные зависимости фазы эхо-сигналов, полученные для двух значений начальной фазы излучаемой волны.

На рис. 6, а, б представлены временные изменения фазы акустического эхо-сигнала, полученные нами 16.12.2003 г. для двух значений начальной фазы излучаемой акустической волны, поочередно изменяющихся во времени.

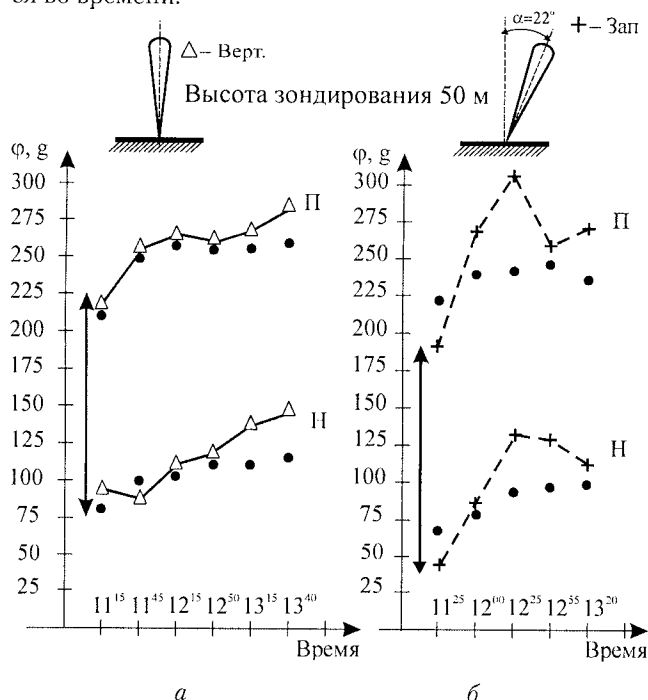


Рис. 6. Зависимость фазы акустического эхо-сигнала от времени для двух углов зондирования:
а – для вертикального направления,
б – для зондирования под углом $\alpha = 22^\circ$ в западном направлении: Н – для неперевернутой начальной фазы излучаемой звуковой волны, П – для перевернутой начальной фазы излучаемой звуковой волны; • – непосредственные результаты измерений, без учета влияния эффекта Доплера

На рис. 6: а – для вертикального зондирования, б – для зондирования под углом $\alpha \cong 22^\circ$ (где α – есть угол между вертикалью и направлением зондирования); Н – для неперевернутой фазы излучаемой звуковой волны, П – для перевернутой на 180° фазы излучаемой звуковой волны; • – измеренные значения фазы, $\Delta, +$ – исправленные значения фазы с учетом влияния ветра для вертикального и наклонного зондирования соответственно.

Измерения проводились при тихой с сильным мокрым снегом погоде с $t \sim 0^\circ\text{C}$ по следующей методике. Сначала измерения проводились в течение ~ 4 мин для вертикального направления (2 мин при неперевернутой фазе «Н» и 2 мин при перевернутой фазе «П»), затем антенна поворачивалась под углом α от вертикали и для этого направления проводились измерения также в течение 4 мин (2 мин при излучаемой фазе «Н» и 2 мин при излучаемой фазе «П»), затем антенна поворачивалась вертикально и снова производились такие измерения для двух направле-

ний и т. д. Вертикальные темные линии на рисунке представляют собой в масштабе рисунка величины разности начальных фаз излучаемой звуковой волны для случая «Н» и «П». (Заметим, что по вертикальной оси отложены значения фазы в показаниях прибора. При этом 300 делений = 360° .)

Как следует из рис. 6, а, б для обоих направлений зондирования практически сохраняется на весь период измерений для принятых эхо-сигналов разность излученных начальных фаз звуковых волн, что свидетельствует об отсутствии зашумляющих или искажающих факторов, влияющих на фазу звуковой волны, прошедшей путь от источника излучения и до рассеивающего объема туда и обратно, и, следовательно, полученные результаты пригодны для их дальнейшей обработки.

На рис. 7, а, б представлено то же самое, что и на рис. 6, а, б, но для других погодных условий (слабый ветер, солнечно, $t = -10^\circ\text{C}$ при зондировании 12.12.2003 г.). Здесь обозначения те же, что и на рис. 6, а, б.

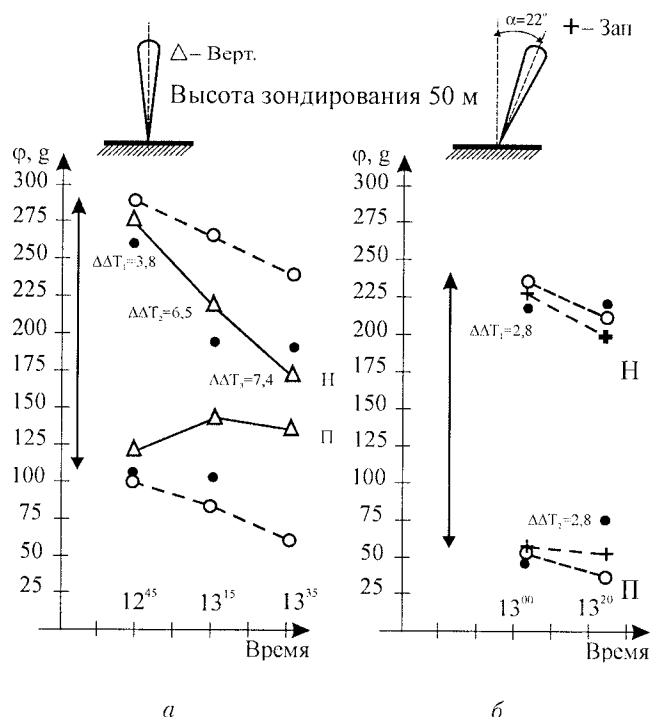


Рис. 7. Зависимость фазы акустического эхо-сигнала от времени для двух углов зондирования:

а – для вертикального направления;
б – для зондирования под углом $\alpha = 22^\circ$ в западном направлении: Н – для неперевернутой начальной фазы излучаемой звуковой волны, П – для перевернутой начальной фазы излучаемой звуковой волны; • – непосредственные результаты измерений, без учета влияния эффекта Доплера, о – исправленные данные в соответствии с [10]

Как следует из рис. 7, а, б, здесь для вертикального зондирования наблюдаются сильные изменения разности начальных фаз в принятых эхо-сигналах по сравнению с разностью начальных фаз для излученных звуковых волн, замечается плавное уменьшение величины разности начальных фаз $\Delta\phi$ для принятых эхо-сигналов со временем. Так, за время от 12^{45} до 13^{35} , т. е. примерно за час, величина $\Delta\phi_{\text{H}}$ уменьшилась почти в 3 раза, тогда как для наклонного зондирования

(рис. 7, б) изменения величины $\Delta\phi$ практически отсутствуют. Следовательно, для того чтобы сравнивать данные, полученные для вертикального и наклонного зондирования, их вначале нужно скорректировать, т. е. убрать ошибку, которая исказила начальный фазовый сдвиг в принятом эхо-сигнале. Воспользовавшись изложенным выше порядком коррекции искажений разности начальных фаз, мы устранили эти ошибки (исправленные кривые на рис. 7, а, б представлены в виде кружков, соединенных пунктирными линиями). Теперь мы уже будем сравнивать исправленные полученные данные, которые являются более корректными. На рис. 7, а, б представлены среднеарифметические значения флуктуаций периода ΔT принятой звуковой частоты, пропорциональные флуктуациям скорости ветра для каждого замера. Обращает на себя внимание возрастание величины ΔT на рис. 7, а, с уменьшением величины $\Delta\phi$, т. е. изменения $\Delta\phi$ определенным образом связаны с изменением параметра ветра, и вероятно, связаны с этими изменениями.

В качестве иллюстрации на рис. 8, 9, 10 представлены результаты измерений фазы акустических эхо-сигналов одновременно в трех направлениях для трех высотных интервалов: на рис. 8 – для высоты 85 м, на рис. 9 – для высоты 50 м, на рис. 10 – для высоты 34 м.

Представленные на рисунках результаты получены в различное время года и при различных погодных условиях. На рис. 8 результаты получены 20.03.2004 г. при пасмурной погоде, после ночного дождя, при очень большой влажности, при умеренном ветре и при температуре $t^\circ \sim +5^\circ\text{C}$.

На рис. 9 результаты получены 6.02.2004 г. при пасмурной погоде, после ночного дождя, при умеренном ветре и при температуре $t^\circ = 0^\circ\text{C}$.

Результаты, представленные на рис. 10, получены 2.06.2004 г. при пасмурной погоде, при сильном порывистом ветре и при температуре $t^\circ = +12^\circ\text{C}$.

На рис. 8, а; 9, а и 10, а представлены исправленные в соответствии с описанной выше методикой [10] результаты измерений, а на рис. 8, б; 10, б – неисправленные, т. е. представлены непосредственно результаты измерений.

Из представленных на этих рисунках результатов измерений, во-первых, следует вполне очевидный факт существования явно выраженной анизотропии фазы акустического эхо-сигнала, наблюдаемый на трех высотных уровнях. Из сравнения рис. 8, а и 10, а соответственно с рис. 8, б и 10, б следует, во-вторых, что искажающее фазу влияние различных факторов наблюдается, однако оно не является определяющим в наблюдаемом различии фаз, измеренных одновременно для различных направлений, поскольку различие между исправленными результатами в соответствии с методикой [10] и неисправленными незначительно.

На рис. 9, б представлены результаты измерений фазы эхо-сигналов, полученных одновременно с данными, представленными на рис. 9, а, но при излучении фазы звуковой волны, перевернутой на 180° относительно фазы излучаемой звуковой волны при получении представленных на рис. 9, а данных. Удовлетворительное соответствие данных, представленных на рис. 9, а и 9, б, между собой свидетельствуют о том, что наблюдаемые зависимости на этих рисунках представляют собой не результаты случайных комбинаций фаз принятых эхо-сигналов, а являются проявлением физических факторов, влияющих на фазу эхо-сигналов, излучаемых под различными углами.

Здесь так же, как и на рис. 3, обращает на себя внимание факт синфазных и близких по величине

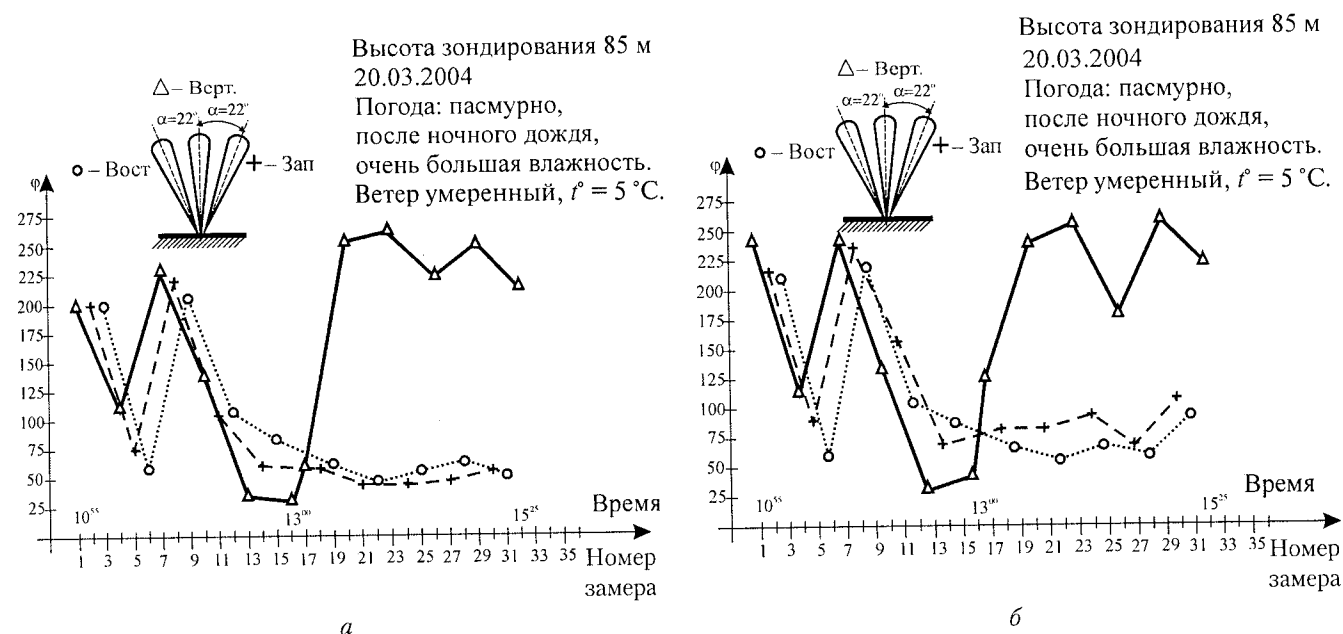


Рис. 8. Зависимость фазы акустического эхо-сигнала от времени для трех углов зондирования: Δ – для вертикального направления, $+$ – для западного направления при угле $\alpha = 22^\circ$, \circ – для восточного направления при угле $\alpha = 22^\circ$: а – исправленные данные в соответствии с [10]; б – непосредственные результаты измерений

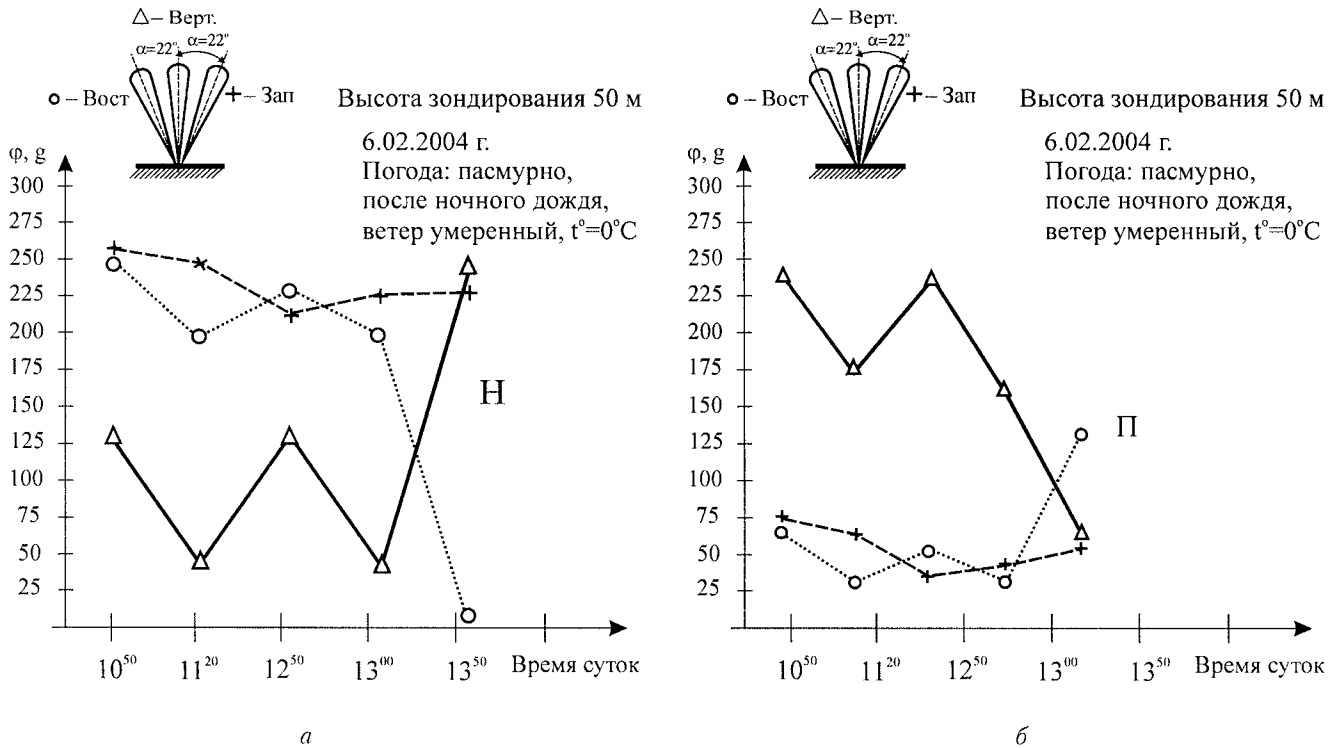


Рис. 9. Зависимость фазы акустического эхо-сигнала от времени для трех углов зондирования: Δ – для вертикального направления, $+$ – для западного направления при угле $\alpha = 22^\circ$, \circ – для восточного направления при угле $\alpha = 22^\circ$: *a* – исправленные данные в соответствии с [10], Н – фаза излучаемой волны неперевернутая; *б* – исправленные данные в соответствии с [10], П – начальная фаза излучаемой волны перевернута на 180° .

временных изменений фазы на рис. 8, *a* и 9, *a*, измеренных одновременно для наклонного зондирования в двух противоположных по азимуту направлениях.

Дело в том, что при зондировании в двух противоположных по азимуту направлениях снос звуковой волны горизонтальным ветром в направлении зондирования проявлялся по-разному: для одного направления звуковая волна сносится этим ветром в одном направлении, а для противоположного – в обратном, что приводит соответственно к изменению измеряемой фазы (для одного направления к увеличению ее, для другого – к уменьшению ее). Следовательно, наблюдаемые у нас синфазные и почти одинаковые по величине временные изменения фазы, измеренной одновременно для двух противоположных по азимуту направлений, свидетельствуют о том, что, наблюдаемые изменения фазы не связаны с каким-либо проявлением горизонтального ветра.

Не связана наблюдаемая одинаковость временных изменений фазы при наклонном зондировании и с проявлением вертикального ветра, ибо в этом случае, во-первых, были бы синфазны временные изменения, наблюдаемые одновременно для наклонного и для вертикального зондирования, а у нас они различны, во-вторых, при наших углах зондирования ($\alpha_1 = 0^\circ$ и $\alpha_2 = 22^\circ$) различие измеренных величин фазы для вертикального и наклонного зондирования было бы незначительным, а у нас наблюдаются существенные различия.

Все это дает основание заключить, что наблюдаемая у нас анизотропия фазы не связана с каким-либо проявлением постоянного ветра.

Из анализа полученных нами экспериментальных данных следует что в большинстве случаев наблюдаемые резкие изменения анизотропии фазы эхо-сигнала связаны с соответствующими изменениями погодных условий у поверхности Земли (см., например, рис. 5, где в 12^{00} появилось солнце и затих ветер. В это время появилась анизотропия фазы эхо-сигнала, до этого времени, согласно рис. 5, анизотропия отсутствовала).

Конечно, не все измеренные нами фазовые зависимости подобны представленным здесь в статье. Наблюдаются зависимости с несколько другими характерными особенностями. Но о них речь пойдет отдельно.

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные нами экспериментальные данные для различных погодных условий, для различного времени года, для различного времени суток и для различной высоты зондирования свидетельствует о существовании явно выраженной анизотропии фазы акустического эхо-сигнала. Наблюдаемая анизотропия существенно изменяется со временем, в зависимости от погодных условий и от высоты. Таким образом, существование явно выраженной анизотропии фазы акустического эхо-сигнала является фактом.

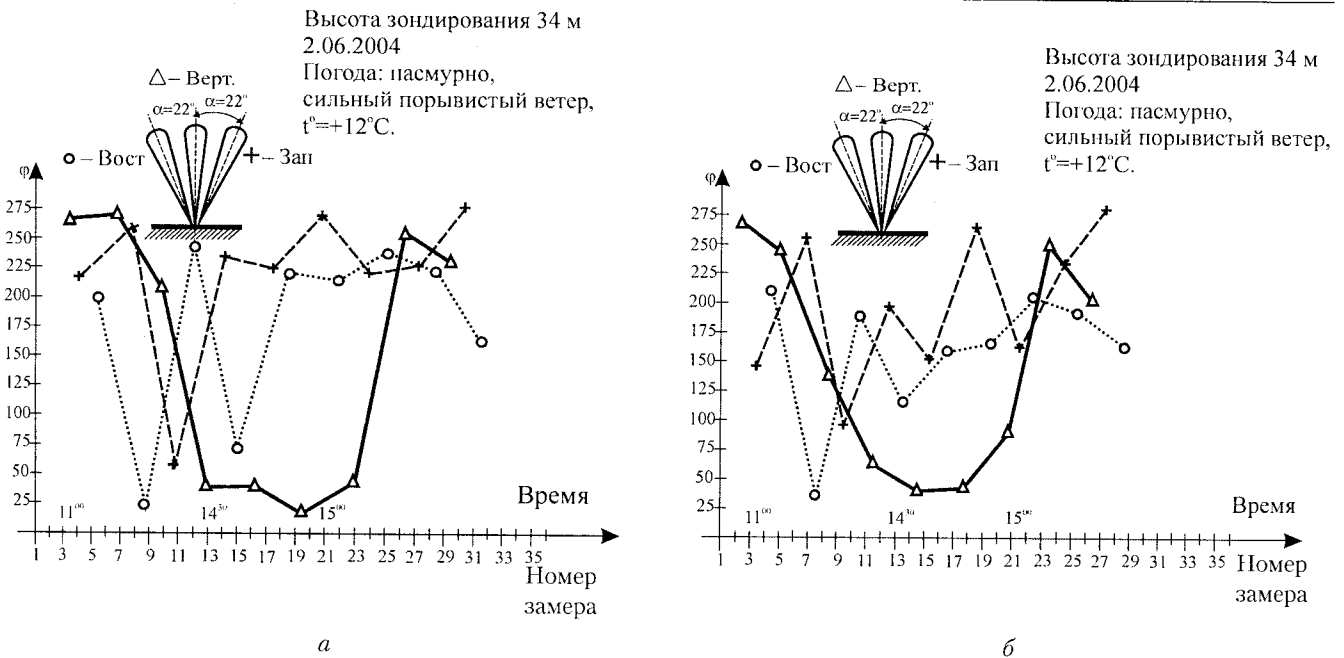


Рис. 10. Зависимость фазы акустического эхо-сигнала от времени для трех углов зондирования: Δ – для вертикального направления, $+$ – для западного направления при угле $\alpha = 22^{\circ}$, \circ – для восточного направления при угле $\alpha = 22^{\circ}$: а – исправленные данные в соответствии с [10]; б – непосредственные результаты измерений

Рассмотрим причины, которые могли бы привести к наблюдаемому эффекту анизотропии фазы акустического эхо-сигнала.

К ним можно отнести следующие факторы: аппаратная нестабильность, влияние ветра, влияние отражений от поверхности Земли [11].

Влияние аппаратной нестабильности фазовых характеристик исключается, поскольку измерения фазы эхо-сигнала для различных направлений производились на одной и той же аппаратуре и при поочередном изменении направлений зондирования.

Влияние ветра могло проявляться *двояко*: либо в виде эффекта Доплера при измерении фазы акустического эхо-сигнала, либо в виде сноса звуковой волны вдоль луча зондирования при движении ее в прямом и обратном направлениях, приводя к увеличению или к уменьшению измеренной разности фаз между опорной частотой и частотой эхо-сигнала.

Влияние эффекта Доплера при измерении фазы эхо-сигнала проявляется в виде изменения периода колебаний эхо-сигнала, что приводит к ошибке при измерении фазы эхо-сигнала [8]. Влияние этого эффекта, как показано было выше, действительно проявляется. Однако его влияние в наших измерениях учитывалось в виде поправки ($\Delta\phi_d$), которая определялась на основании измеряемой одновременно с фазой и частоты Доплера. Причем проявление этого эффекта на временных изменениях анизотропии фазы не является определяющим. Что же касается проявления этого фактора при измерении фазы с умножением частоты в 32 раза, то его влияние проявлялось в виде систематической ошибки, одинаковой для всех наблюдаемых в экспериментах скоростей ветра. Эта систематическая ошибка будет одинаковой для всех на-

правлений зондирования и при сравнении измеренных значений фазы будет взаимно компенсироваться.

Влияние ветра (постоянного и быстрых изменений его по величине):

а) Влияние постоянного ветра может проявляться в виде сноса звуковой волны в направлении луча зондирования при движении ее к рассеивающему объему атмосферы и в обратном направлении. Однако это влияние взаимно компенсируется, поскольку время, за которое звуковая волна поменяет направление движения на обратное, мало и заметных изменений скорости постоянного ветра за это время не произойдет.

б) Влияние быстрых пульсаций скорости ветра, а также ее быстрых нарастаний или спадов будет проявляться таким образом, что снос ветром звуковой волны при ее движении в прямом и обратном направлениях будет неодинаков, и это будет приводить к пульсациям измеряемой фазы. Что касается влияния быстрых нарастаний или спадов скорости ветра, то этот эффект будет приводить к увеличению или уменьшению измеряемой фазы со временем (см. рис. 7, а). Однако влияние этих эффектов на измеряемую фазу эхо-сигналов учитывается разработанной методикой [10] путем зондирования последовательно при двух значениях начальной фазы звуковой волны. Поэтому при сравнении измеренных для различных направлений зондирования фаз эхо-сигналов в них предварительно устранялось влияние этих эффектов в соответствии с методикой [10].

Влияние переотражений от местности тоже может проявляться на измеряемой фазе акустического эхо-сигнала [11]. Как показали наши специальные исследования, оно в основном проявляется в виде зашумляющего излучаемую фазу эхо-сигнала фактора и не является определяющим в наблюдаемых из-

менениях анизотропии фазы акустического эхо-сигнала. Для учета влияния этого эффекта также использовалась методика [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Полученные нами экспериментальные данные свидетельствуют о существовании явно выраженной анизотропии фазы акустического эхо-сигнала, которая определенным образом связана с погодными изменениями и временем суток.

2. Рассмотренные различные факторы, способные привести к наблюдаемой анизотропии фазы акустического эхо-сигнала, не являются ответственными за наблюдаемый эффект, что дает основание считать наблюдаемый эффект анизотропии фазы акустического эхо-сигнала связанным с существованием соответствующей анизотропии температуры атмосферы.

3. Полученные нами результаты находятся в удовлетворительном согласии с гипотезой [1], и таким образом подтверждают ее.

4. Если факт существования анизотропии молекулярных процессов в атмосфере Земли считать реальностью, то тогда:

а) Становятся понятными не находившие удовлетворительного объяснения до настоящего времени результаты калибровочных измерений [11, 12], проводившихся с целью установления зависимости между температурой атмосферы, измеряемой термометром, установленном на воздушном шаре, и фазой акустического эхо-сигнала, наблюдаемой при вертикальном акустическом зондировании. Ведь измеряемая фаза эхо-сигнала при вертикальном акустическом зондировании пропорциональна вертикальной составляющей температуры, термометр на воздушном шаре измеряет усредненную для всех направлений температуру, а их временные и высотные изменения порой могут быть совершенно различными, о чем свидетельствуют наши экспериментальные данные.

б) Полученные нами экспериментальные данные убедительно свидетельствуют о высокой чувствительности акустического способа измерения температуры атмосферы, что позволяет широко использовать его при акустическом зондировании атмосферы в различных прикладных целях, давая, таким образом, новое дыхание акустическому зондированию.

Литература: 1. Делов И.А. Анизотропия параметров ионизованного метеорного следа, связанных с молекулярными процессами в атмосфере. // Изв. АН СССР. Геомагнетизм и аэрномия. 1986. — Т. 26, № 2. — С. 265–268. 2. Кащеев Б.Л., Лебединец В.Н., Лагутин М.Ф. Метеорные явления в атмосфере Земли. — М.: Наука, 1967. — 259 с. 3. Делов И.А., Слипченко М.И. Спосіб дистанційного вимірювання відносних змін температури повітря за допомогою акустичного зондування атмосфери. Патент України № 46521 А від 15.05.2002 р. 4. Делов И.А., Слипченко Н.И. Некоторые результаты изме-

рений фазовых характеристик акустических эхо-сигналов при зондировании атмосферы одновременно в двух различных по углу места направлениях. // Радиотехника. Всеукр. научн.-техн. сб. Вып. № 124, 2002. — С. 49–57. 5. I.A. Delov, N.I. Slipchenko. Some new results of acoustic echo-signals phase characteristics measurements when sounding atmosphere simultaneously in two directions different in the angular altitude. Proceedings of the 11th international symposium on acoustic remote sensing and associated techniques of the atmosphere and oceans. 24–28 June 2002, Rome, Italy. — P.P. 69–72. 6. Делов И.А., Слипченко Н.И. Тонкие физические эффекты в атмосфере Земли, наблюдаемые при радиолокации ионизированных метеорных следов и акустическом зондировании пограничного атмосферного слоя. 88 с. Рук. Деп. в ДНТБ Украины, № 142-УК-2002 от 11.11.02. 7. Делов И.А., Слипченко Н.И. Исследование неоднородной структуры атмосферы и анизотропии атмосферных процессов с помощью дистанционного зондирования. — В кн.: Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере земли. — Харьков, 2002. — С. 207–220. 8. Делов И.А., Слипченко М.И. Спосіб дистанційного вимірювання відносних змін температури повітря за допомогою акустичного зондування атмосфери. Патент України № 46521 А від 15.05.2002 р. 9. Делов И.А., Слипченко Н.И. Измерение фазовых характеристик акустических эхо-сигналов на частоте зондирования при зондировании одновременно в двух различных по углу места направлениях. 18 с. Рук. Деп. в ДНТБ Украины, № 81-УК-2002 от 17.06.03. 10. Делов И.А., Слипченко М.И. Спосіб дистанційного вимірювання відносних змін температури повітря за допомогою акустичного зондування атмосфери. Заявка на патент України № 20040604605 від 14.06.2004 р. 11. Braoley S.G., Hipkin V.J. and Underwood K. The relationship between the phase of a sodar signal and atmospheric temperature // Proc. 10th Intern. Sympos. On Acoustic Remote Sensing and Associated Techniques of the Atmosphere and Oceans Auckland, 2000, New Zealand, P.13-18. 12. SurrIDGE A.D. On a phase sensitive acoustic sounder. J. Atmos. Terres. Phys., 49, P. 105–110, 1978.

Поступила в редколлегию 19.07.2004



Делов Иван Акиндинович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник ПНИЛ зондирования атмосферы ХНУРЭ, работает в области зондирования атмосферы (с 1958 г. — с помощью радиолокации метеорных следов, с 1983 г. — с помощью акустического зондирования). Область научных интересов: исследование анизотропии атмосферных процессов.



Слипченко Николай Иванович, канд. техн. наук, проректор по научной работе ХНУРЭ, профессор кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Область научных интересов: твердотельная электроника, моделирование процессов, нанозондирование и нанозондирование атмосферы.