

АКУСТИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ В ЗАДАЧЕ ОБНАРУЖЕНИЯ И РЕГИСТРАЦИИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

Введение

Основное количество тепла атмосфера Земли получает в результате контакта воздуха с нагретой подстилающей поверхностью [1 – 3]. Потому погодные и климатические изменения на планете контролируются главным образом процессами теплообмена в системе «подстилающая поверхность – атмосфера».

Как известно [1], в приземном слое атмосферы теплообмен происходит в основном в режиме турбулентного движения. Полного набора моделей для расчета потоков турбулентного тепла для всех возможных состояний атмосферы в настоящее время еще не получено. Следовательно, исследования в этой области являются важным современным направлением метеорологии и климатологии.

Очевидно, что для создания моделей теплообмена необходим анализ результатов экспериментальных измерений метеовеличин и параметров состояния в приземном слое атмосферы.

В настоящее время для измерения турбулентных потоков тепла, влаги и количества движения используются два стандартных метода. Это «профильный», или градиентный метод, основанный на использовании теории подобия Монина – Обухова [4, 1], и пульсационный или «прямой» метод [5 – 7, 4], основанный на измерении турбулентных пульсаций температуры, влаги и скорости ветра. В обоих случаях измерения температуры и скорости ветра производятся контактными точечными датчиками.

Эти методы имеют существенные недостатки. Результаты, удовлетворительные по достоверности, могут быть получены только в условиях однородной подстилающей поверхности и в тех случаях, когда профили температуры мало отличаются от адиабатической зависимости, но не равны ей (термодинамическое состояние, близкое к равновесному).

Однако тепло в атмосфере над сушей передается турбулентными молями, получившими тепло в результате контакта воздуха с относительно теплой подстилающей поверхностью. Нагретые массы воздуха обладают силой плавучести и вносят возмущения в адиабатический профиль температуры, то есть представляют собой компонент неустойчивости в равновесном состоянии атмосферы.

Исходя из значимости проблем прогнозирования погодных условий, климатологии и экологии, создание средств измерения параметров состояния турбулентных полей в пределах высоты приземного слоя атмосферы в реальном масштабе времени следует рассматривать как одну из важнейших проблем метеорологического приборостроения.

В среде мегаполисов эта проблема приобретает особое значение. В этой среде условия проживания отягощаются собственным микроклиматом, который в большинстве случаев создает условия для накопления вредных выбросов в приземном слое атмосферы. При этом в некоторых районах мегаполиса могут временно возникать и сверхдопустимые значения концентрации вредных выбросов.

Процессы формирования местного климата мегаполисов еще не изучены в полной мере. При этом очевидно, что стандартные методы измерения потоков турбулентного тепла в среде мегаполисов не могут быть эффективными.

Как следует из работ [8 – 11], метод акустического зондирования принципиально позволяет измерять турбулентные потоки тепла $Q = c_p \rho \overline{w'T'}$, влаги $E = \rho \overline{q'w'}$ и количества движения $\tau = \rho \overline{w'u'}$ в реальном времени и представлять результаты в виде функций высоты. Исходными данными в этом случае являются параметры турбулентного движения, а именно,

C_T^2 – коэффициент структурной функции поля температуры и σ_w – СКО вертикальной скорости ветра, параметры, которые принципиально могут быть получены из мощности P_r и доплеровского сдвига f_D частотного спектра эхосигналов акустического зондирования.

В соответствии с современным подходом к извлечению информации в системах акустического зондирования, выходные параметры рассчитываются по каждому отдельному измерению эхосигналов (поимпульсные измерения) [12]. Однако, как показывает опыт автора, при таком подходе следует учитывать ряд существенных ограничений, которые вносит среда мегаполиса в эффективность метода акустического зондирования. К таким ограничениям относятся, прежде всего, акустические помехи и отражения от окружающих зданий и сооружений [12, 13].

Предварительные результаты исследований акустических помех в зоне мегаполиса, проведенных автором, приведены в работе [12]. В настоящей работе приводятся результаты более детального анализа акустических помех и отражений от местных предметов, окружающих станцию зондирования.

Цель работы состоит в анализе факторов, ограничивающих функциональные возможности систем акустического зондирования в зоне мегаполисов и в усовершенствовании подходов к построению аппаратной и алгоритмической частей систем акустического зондирования для получения количественной информации о процессах притока и преобразования тепла в приземном слое атмосферы.

Акустические помехи

Анализ записей акустического зондирования в зоне мегаполиса показывает, что практически в каждом сеансе зондирования наблюдаются спонтанные акустические помехи, интенсивность которых во много раз превосходит интенсивность эхосигналов. На рис.1 приведен пример записи эхосигналов, подтверждающий это положение.

Мощные помехи перегружают приемный тракт и при поимпульсном анализе всякий раз возникает задача определения области существования сигналов с достаточной для измерений величиной соотношения сигнал/шум q , например $q > 15dB$. Поэтому цель анализа помех состоит в определении подходов к разработке правила построения системы обнаружения и измерения параметров эхосигналов в системах акустического зондирования.

Для описания акустических помех как фактора, ограничивающего функциональные возможности систем акустического зондирования, в период с 17 мая по 3 июля 2013 г были проведены регулярные экспериментальные наблюдения по акустическому зондированию атмосферы. Наблюдения проводились на постоянно действующей станции акустического зондирования, созданной и установленной на территории Харьковского национального университета радиоэлектроники [12 – 14].

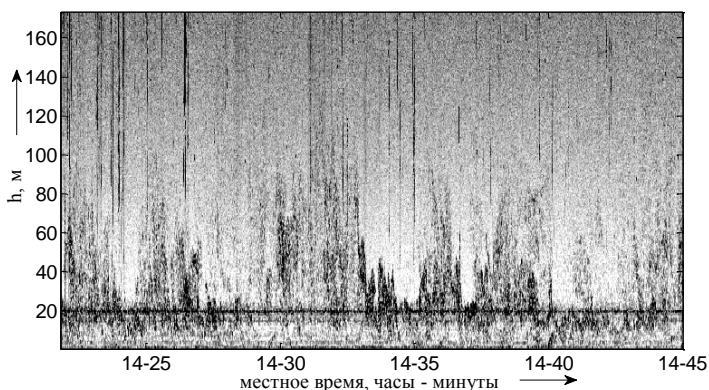


Рис.1

За этот период было проведено 178 сеансов зондирований общей продолжительностью 140 часов. Из полученного материала для анализа акустических помех было отобрано 62 сеанса общей продолжительностью 52 часа. Общий объем анализируемой выборки X составил $N_X \cong 6,0 \cdot 10^7$ измерений.

Выделение акустических помех X_N из совокупности $X = X_S + X_N$, где X_S – составляющая эхосигналов, проводилось по методике, приведенной в [12]. Согласно этой методике

областью «чистой» помехи считается часть эхограммы, ограниченная высотой зондирования h_N , начиная с которой усредненный профиль принятой смеси не изменяется с ростом высоты. Такой подход основан на положении о том, что статистические характеристики шума для всей совокупности значений эхограммы при $h \geq h_N$ и $h < h_N$ существенно не отличаются, т. е. характеристики помехи не зависят от высоты слоя зондирования. На рис.2 показано определение граничной высоты слоя ($h_N \geq 100$ м) по усредненному профилю эхосигналов, который получен по данным записи рис.1.

В результате процедуры выделения была получена выборка помех X_N объемом $N_{XN} \cong 3,7 \cdot 10^7$, продолжительностью $\Delta t_x \cong 52$ час. Расчет оценок статистических моментов по всей совокупности величины X_N дает значения: $\tilde{M}_N[X] = 7,5 \cdot 10^{-3}$, $\tilde{P}_{MN}[X] = X_{\max} / \tilde{\sigma}_N = 101,8$, где \tilde{P}_{MN} – нормированный максимум, $\tilde{\sigma}_N[X] = 9,8 \cdot 10^{-3}$. Динамический диапазон помехи составляет $D_N = 98$ dB.

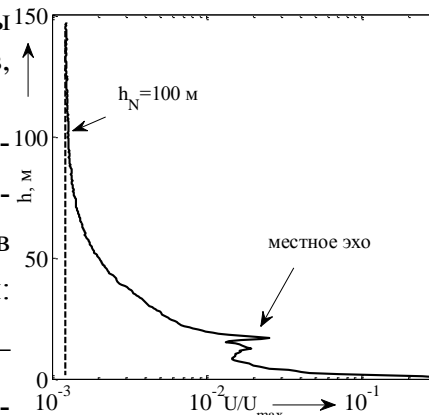


Рис. 2

Для сопоставления расчет статистических моментов случайной величины R , распределенной по закону Релея при соблюдении условий $N_X = N_R$ и $\tilde{M}_N[X] = 1,25 \cdot \tilde{\mu}_R[R]$, дает следующие значения: $\tilde{\sigma}_R[R] = 3,9 \cdot 10^{-3}$, $\tilde{P}_{MR}[R] = X_{\max} / \tilde{\sigma}_R = 1,91$.

Видно, что величина нормированного максимума ($\tilde{P}_{MN} / \tilde{P}_{MR} \cong 53$) хорошо формализует присутствие в исследуемом массиве отдельных значений акустических помех, величина которых много больше среднего значения. Можно предположить, что возникновение такого рода помех является причиной отличия распределения вероятностей реальной помехи от детерминированного распределения Релея.

Для определения вероятности появления мощных помех было рассчитано распределение статистической вероятности $P^*[X_N]$ реальной случайной величины X_N и модели R_N случайной величины, распределенной по закону Релея. На рис.3, а, б приведены графики общего распределения и его начального участка.

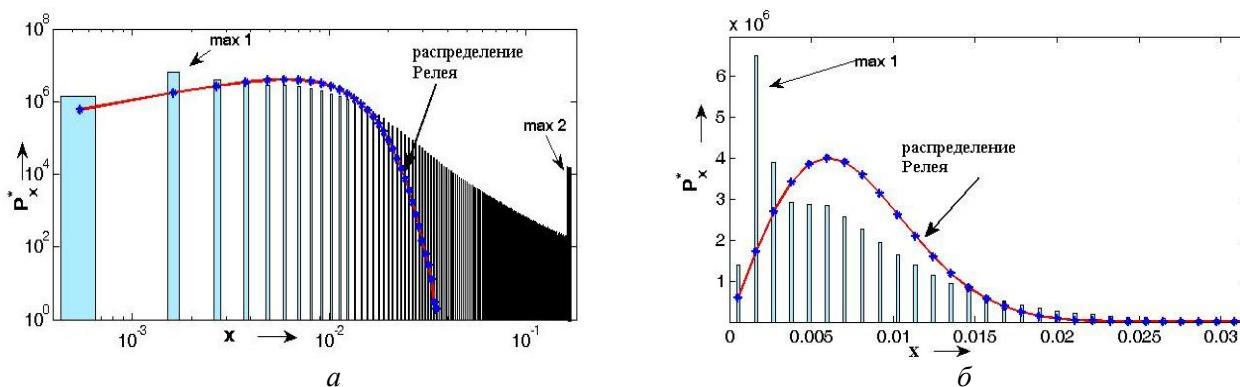


Рис. 3

Из общего распределения (рис.3, а) следует, что в правой части наблюдается второй максимум, а собственно распределение много шире детерминированного. Однако, как следует из начального участка рис.3, б, вероятность мощных значений относительно невелика и составляет $H_{NM}^* \cong 0,03$ или $N_{NM} \approx 3\%$ от общего числа N_{XN} членов выборки X_N . При

этом первый максимум явно выделяется. Это означает, что структура акустических помех представляет собой совокупность однородного «шума» относительно малой мощности и мощных импульсных помех.

Большая величина динамического диапазона помехи свидетельствует о том, что на относительно коротких интервалах времени уровень помех может быть много ниже, чем максимальное значение, и, следовательно, достижимая (пороговая) чувствительность системы к экосигналам на этих интервалах может быть существенно большей.

Также важным является вопрос о минимальной продолжительности временного интервала, для которого допустим расчет оптимального порога обнаружения сигналов на основе априорной информации о распределении помех.

Для решения этих задач необходимо проанализировать временную стационарность акустических помех.

Для оценки стационарности помех рассматривалось изменение оценок статистических моментов, рассчитанных на интервалах времени Δt_g как для некоторого граничного значения, принятого на основании результатов работ [15, 16].

Как показано в [15], в процессе развитого теплообмена распределение по длительностям возмущений в нижнем слое имеет две явно выраженные составляющие с периодами $\tau_M = 5,4 \text{ мин}$ и $\tau_M = 8,66 \text{ мин}$. Из работы [16] следует, что такие возмущения на временной оси образуют квазипериодическую структуру с периодом $T_{g3} \cong 16 \text{ мин}$. Следовательно, для обнаружения и регистрации термодинамических возмущений необходимо средние значения данных акустического зондирования рассчитывать на интервалах времени $T_{g3} > \Delta t_g > \tau_M$. Этому условию отвечает значение $\Delta t_g = 10 \text{ мин}$.

На рис. 4, а – в приведены графики временных зависимостей статистических моментов акустических помех.

Расчет оценок статистических моментов изображенных зависимостей дает следующие значения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{M}_N [M_{x10}] = 1,2 \cdot 10^{-3} \\ \tilde{\sigma}_N [M_{x10}] = 0,8 \cdot 10^{-3} \end{array} \right\}, \left\{ \begin{array}{l} \tilde{M}_N [P_{x10}] = 49,34 \\ \tilde{\sigma}_N [P_{x10}] = 17,7 \end{array} \right\}, \left\{ \begin{array}{l} \tilde{M}_N [\sigma_{x10}] = 1,1 \cdot 10^{-3} \\ \tilde{\sigma}_N [\sigma_{x10}] = 0,86 \cdot 10^{-3} \end{array} \right\}.$$

Полученные величины показывают, что при усреднении на интервалах $\Delta t_g = 10 \text{ мин}$ помехи все еще представляют собой существенно нестационарный процесс. При этом динамический диапазон изменения статистических моментов соответственно составляет $D_{Mx} = 23,6 \text{ dB}$, $D_{\sigma x} = 36 \text{ dB}$, $D_{Px} = 20,1 \text{ dB}$.

Для того чтобы оценить, насколько существенна такая нестационарность для обнаружения и измерения параметров сигналов, необходимо сопоставить значения статистических моментов экосигналов и помех.

Акустические сигналы

Оценки статистических моментов экосигналов были рассчитаны по массиву X_S , который составляет часть массива X для значений высоты слоя зондирования $h_0 \leq h < h_N$, где h_0 – начальная высота слоя $h_0 = 5 \text{ м}$. При этом из рассмотрения были исключены данные, относящиеся к отражениям от местных предметов (см. рис.1). Для большей наглядности распределение статистической вероятности P^* сигналов представлено в виде двух самостоятельных распределений, построенных по двум подмассивам X_{S1} и X_{S2} . Подмассивы получены из основного массива X_S в соответствии с принятым условием $x_{i1} > g$ и $x_{i2} \leq g$, где g – некоторое граничное значение, в рассматриваемом случае принято $g = 0,015$. Значение параметра g выбрано из условий:

$$P^*[x_{\min}, x_g] = 0,95 \quad \text{и} \quad P^*[x_g, x_{\max}] = 0,05.$$

Результаты расчетов приведены на рис.5.

Полученные распределения показывают, что только малая часть эхосигналов надежно превышает уровень помех и, следовательно, при априорном расчете порога обнаружения и поимпульсном анализе эхосигналов весьма малая часть информации может быть извлечена в системах акустического зондирования при их использовании в реальных условиях мегаполиса. При этом увеличение излучаемой мощности на порядок, что проблематично, не приведет к радикальному изменению этого положения.

В то же время визуальный анализ эхограмм практически в каждом случае позволяет сделать однозначный вывод о присутствии (отсутствии) эхосигналов и дать качественное описание их пространственно-временному распределению.

Следовательно, при решении поставленной задачи оптимальным подходом к обнаружению и регистрации термодинамических возмущений будет анализ не каждого отдельного измерения, а анализ свойств выборок эхосигналов в целом как объекта исследования с выявлением в нем отдельных фрагментов, которые предположительно являются следствием исследуемого явления, в данном случае - термодинамических возмущений.

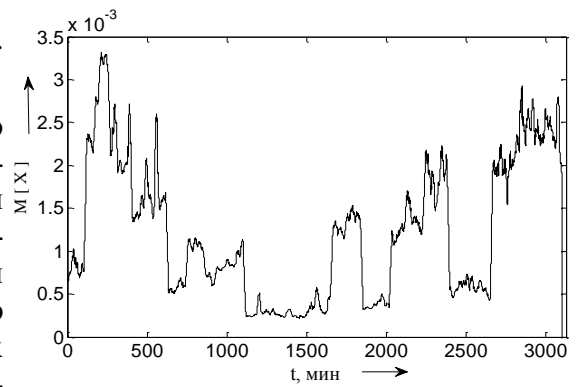
Исходя из модели рассеяния эхосигналов, предложенной в работе [13], можно предположить, что при данном типе эхограммы все принятые эхосигналы обусловлены рассеянием на термодинамических возмущениях, при этом эхосигналы сгруппированы в отдельные структурные элементы.

Анализ экспериментальных данных показывает, что визуальное обнаружение сигналов, при полученных соотношениях сигнал/шум (рис. 5) наблюдается как следствие увеличения «плотности» эхосигналов эхограмм (см. например, рис.1), которые получены в виде матрицы $S_{eco} = (s_{i,j})_{i=1,j=1}^{m,n}$.

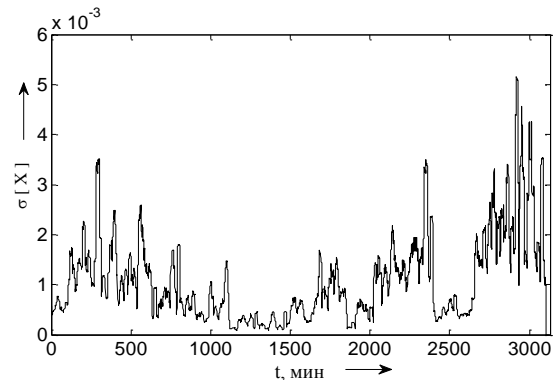
Формализуем понятие $D_{x_{i,j}}$ в следующем виде

$$D_{s_{i,j}} = \frac{1}{(dm \cdot dn)} \left[\sum_{p=1,q=1}^{dm, dn} s_{p,q} \right] \quad (1),$$

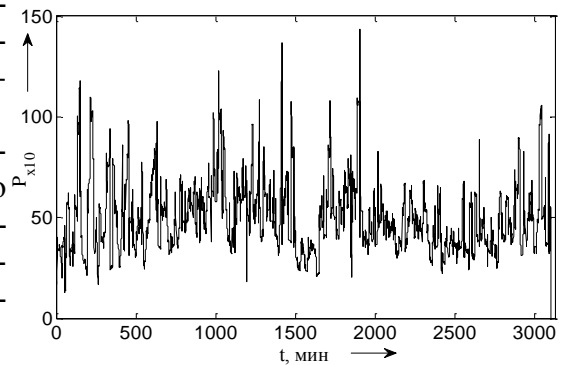
и в дальнейшем будем проводить обнаружение возмущений по эхограммам «плотности», которые получим в виде матрицы S_D , члены которой получим в соответствии с выражением



а



б



в

Рис. 4

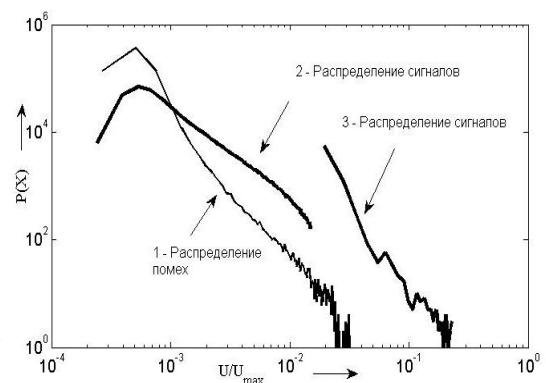


Рис. 5

$$S_D(i, j) = D_s(i, j) = \frac{1}{(dm \cdot dn)} \left[\sum_{p=i, q=j}^{i+dm, j+dn} s_{p,q}(i, j) \right], \quad (2),$$

где dm, dn – размер элементов исходной матрицы S_{eco} эхосигналов, по которым рассчитывается «плотность» $D_{x_{i,j}}$, $i = 1 \dots (m - dm + 1)$, $j = 1 \dots (n - dn + 1)$, $p = i + dm - 1$, $q = j + dn - 1$.

На рис.6 приведен пример эхограммы «плотности», полученной из эхограммы рис.1 при $dm = 5$ и $dn = 10$. Полученный результат показывает существенное увеличение различимости эхосигналов, характеризующих термодинамические возмущения в приземном слое атмосферы. В последующих работах будет формализовано понятие «различимости» в задаче извлечения информации о термодинамических возмущениях в системах акустического зондирования.

Отражения от местных предметов

Еще одним фактором, ограничивающим функциональные возможности системы в среде мегаполиса, являются отражения от местных предметов, окружающих станцию акустического зондирования.

На рис.7 приведен пример усредненного профиля эхосигнала и его СКО в области отражения от верхней кромки здания, вблизи которого установлена антенная система станции зондирования.

Основной особенностью таких сигналов в акустическом зондировании является их относительно большая величина и флуктуации, сопоставимые с флуктуациями полезного сигнала.

Как показывает анализ записей, эхосигнал местных предметов представляет собой аддитивную смесь отражений от собственно местного предмета и эхосигнал, создаваемый тепловыми потоками от нагретого материала (здания). При этом дополнительные флуктуации создаются пульсациями скорости ветра и нестационарностью эффекта рефракции, так как эхосигнал в данном случае принимается боковым лепестком диаграммы направленности антенны.

Судя по величине слоя высоты Δh_m , на который приходится такие отражения, простая отбраковка приводит к ощутимым потерям информации

В данном эксперименте для минимизации уровня боковых лепестков диаграммы направленности антенн были использованы защитные экраны пирамидальной формы высотой $h_{экp} = 1,5 м$, внутренняя поверхность которых покрыта звукопоглощающим материалом. Это позволило снизить уровень боковых лепестков до значения $P_{бок} \cong -55 dB$. Дальнейшее усовершенствование защитного экрана радикально это положение не улучшит в связи с тем, что коэффициент отражения от зданий велик. Поэтому для исключения промахов при регистрации эхосигналов в описываемом исследовании применялась процедура отбраковки данных, относящихся к области отражений от местных предметов.

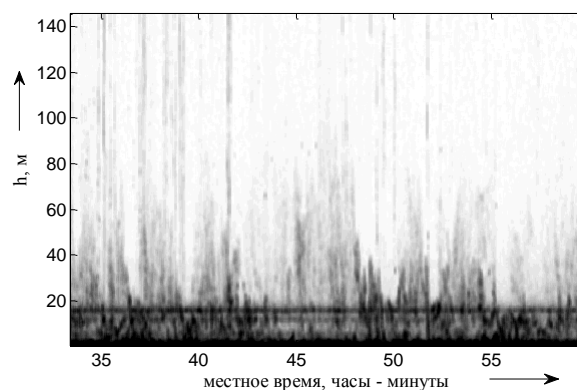


Рис. 6

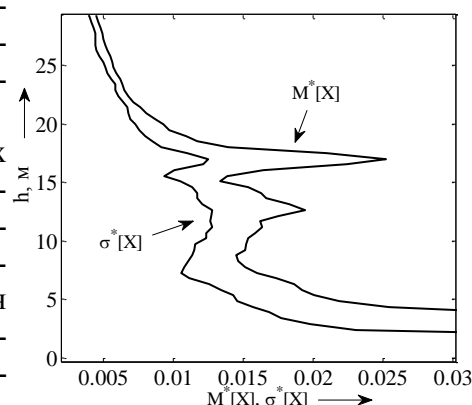


Рис. 7

Выводы

В результате проведенных экспериментальных наблюдений получено дополнительное обоснование эффективности метода акустического зондирования для решения задачи обнаружения и регистрации термодинамических возмущений в приземном слое атмосферы, явлений, которые ответственны за приток явного и скрытого тепла в пограничном слое атмосферы.

Проанализированы акустические помехи, акустические эхосигналы, включая и отражения от местных предметов как факторы, ограничивающие эффективность акустической системы в зоне мегаполиса, введено понятие и показана целесообразность анализа распределений «плотности эхосигналов» в системах акустического зондирования.

Список литературы: 1. *Матвеев, Л.Т.* Курс общей метеорологии. Физика атмосферы / Л.Т. Матвеев – Л. : Гидрометиздат, 1976. – 640 с. 2. *Элементарный учебник физики.* Теплота. Молекулярная физика. Физика атмосферы. § 308. Тепловой баланс Земли. – Режим доступа : [\www/physel.ru/content/view/312/25/-61k](http://www.physel.ru/content/view/312/25/-61k) . 3. *Зубарев, Д. Н.* Физико-химия земной атмосферы. – Режим доступа : www.krugosvet.ru/articles/123/1012337/1012337a1.htm – 21к. 4. *Монин, А. С.* Основные закономерности турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы / А. С Монин, А. М. Обухов // Труды Геофиз. ин-та АН СССР. – 1954. – № 24 (151). – С. 163 – 187. 5. *Безуглова, Н.Н.* Мониторинг пограничного слоя атмосферного воздуха (в условиях промышленного города). – Режим доступа: www.conf.nsc.ru/files/conferences/niknik-90/fulltext/... 6. *Бовшевверов, В.М., Воронов В.П.* Акустический флюгер // Изв. АН СССР. – Сер. геофиз. – 1960. – № 6. – С. 882 – 885. 7. *Тихомиров, А.А.* Ультразвуковые анемометры для измерения пульсаций скорости воздушных потоков : обзор // Оптика океана и атмосферы. – 2010. – 23, №7. 8. *Wyngaard, J. C., J. Izumi, and S. A. Collins, Jr,* 1971: Behavior of the refractive index structure parameter near the ground. J. Opt. Soc. Am. 61, 1646-1650. 9. *Coulter, R. L.* Remote sensing of meteorological quantities. 11th International Symposium on Acoustic Remote sensing of the atmosphere and Oceans 24-28 June 2002, Rome, Italy 10. *Weill, A.* Measuring heat flux and structure functions of temperature fluctuations with an acoustic Doppler sodar / Weill, A., Klapisz, C., Strauss, B., Baudin, F., Jaupart, C. Van Grundebeeck, P. and Goutorbe, J. P. // Журн. J. Appl. Meteorol. – 1980. – №19. – P. 199-205. 11. *Helmis, C.G., Kalogiros, J.A., Papadopoulos, K.H., Soilemes, A.T. and Asimakopoulos, D.N.* Estimation of the atmospheric surface momentum and heat fluxes using a high resolution acoustic radar // Journal de Physique IV Colloque C5, supplement au Journal de Physique III, Volume 4, mai 1994, P C5-287 – C5-290. 12. *Леонидов, В.И.* Статистические характеристики эхосигналов акустического зондирования в зоне мегаполиса / В.И. Леонидов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2012. – №6/4, (60). – С.46-50. 13. *Леонидов, В.И.* Модельно-структурный анализ эхосигналов акустического зондирования атмосферы / В.И. Леонидов // Радиотехника. – 2012. – Вып. 171. 14. *Семенец, В.В.* Акустическое зондирование атмосферы в проблеме изучения процессов теплообмена в зоне мегаполиса / В.В. Семенец, В.И. Леонидов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2011. – 6/8(54). – С.54. 15. *Леонидов, В.И.* Формализация описания эхограмм акустического зондирования атмосферы в зоне мегаполиса / В.И. Леонидов, В.В. Семенец // Радиотехника. – 2010. – Вып.160. – С 177 – 183. 16. *Леонидов, В.И.* Анализ квазипериодических амплитудно-временных структур эхосигналов акустического зондирования атмосферы / В.И. Леонидов, В.В. Семенец // Радиотехника. – 2011. – Вып.167. – С. 27 -31.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 03.10.2013