

УДК 534.2

Н.П. КРАСНЕНКО, **, А.С. РАКОВ*, Д.С. РАКОВ*, Л.Г. ШАМАНАЕВА******ВЛИЯНИЕ ИМПЕДАНСНЫХ СВОЙСТВ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ
НА ОСЛАБЛЕНИЕ ЗВУКА ПРИ ПРИЗЕМНОМ РАСПРОСТРАНЕНИИ¹**

Рассмотрены вопросы распространения звуковых волн над земной поверхностью. Даны формулы для расчета ослабления звука, вызванного наличием подстилающей поверхности. Приведены различные модели импеданса подстилающей поверхности. Показаны результаты теоретических расчетов ослабления звука при его распространении над различными типами подстилающих поверхностей. Проанализировано влияние геометрии распространения звука на его характеристики.

Ключевые слова: распространение звука, атмосфера, подстилающая поверхность земли, импеданс.

Введение

Распространение звука вблизи поверхности земли имеет свои особенности, в отличие от распространения в свободном пространстве [1–11]. Это отмечалось, в частности, и в лекции Рэлеевского медалиста П. Паркина в прочитанной в Институте акустики Ливерпульского политехнического университета (Великобритания) в 1975 г. [10, 12]. Помимо существенного влияния метеорологических условий (значений скорости и направления ветра, температуры и влажности воздуха, характеристик турбулентности атмосферы и их распределения с высотой), на приземное распространение звука влияет подстилающая поверхность земли, а точнее, ее импедансные свойства и рельеф, которые определяют величину коэффициента отражения звуковых волн от земли и, в конечном счете, величину их ослабления. Влияние земной поверхности будет определяющим на относительно малых расстояниях в пределах прямой видимости и в тех случаях, когда рефракция звука будет несущественной. Это в большей степени характерно для пасмурной погоды и безразличной стратификации атмосферы.

Проблема влияния земной поверхности особенно актуальна при распространении широкополосных сигналов, которые используются в системах вещания, связи, локации, а также при решении экологических проблем, связанных с воздействием внешних акустических шумов. Влияние поверхности земли сводится к тому, что с расстоянием меняется не только величина сигнала (уровень звукового давления), но и изменяется форма амплитудно-частотной характеристики передаваемого (или принимаемого) сигнала. С одной стороны, на это влияет интерференция волн в точке приема, имеющая место при поднятых над поверхностью земли источнике и приемнике звука, что характерно для используемых на практике акустических систем, с другой стороны, это обусловлено частотной зависимостью импеданса земной поверхности.

За годы проведенных исследований были разработаны различные модели акустического импеданса земной поверхности, отличающиеся количеством входящих параметров. Однако ввиду большого разнообразия подстилающих поверхностей трудно на практике выделить какую-то одну приемлемую модель акустического импеданса для расчетов ослабления звука.

Проанализируем существующие модели акустического импеданса земной поверхности и их применимость на практике для расчетов уровня звука при приземном распространении, а также рассмотрим поведение разности фаз между прямой и отраженной волной в точке приема для поднятых над землей источника и приемника, что обуславливает интерференцию волн. Такая геометрия распространения типична для практических приложений. Анализ делается для того, чтобы понять суть происходящих процессов при распространении звуковых волн над различными типами подстилающих поверхностей.

**Модель приземного распространения звуковых волн на относительно малые расстояния
в пределах прямой видимости**

Данная модель основывается на том, что в заданную точку пространства от источника приходят два луча: прямой и отраженный от поверхности земли (рис. 1), причем прямой луч не имеет

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 12-02-31154/мол_а.

точки поворота (нет рефракции). Такая ситуация возможна, как уже упоминалось выше, при одновременно малых значениях скорости ветра и градиенте температуры воздуха для относительно коротких длинах трасс распространения звука r порядка нескольких десятков и сотен метров. Данная модель распространения звука в приземном слое атмосферы соответствует нейтральному режиму распространения звука [9].

Суммарное звуковое давление в точке приема можно записать как

$$p = p_d + R_p \cdot p_r, \quad (1)$$

где p_d – звуковое давление прямой волны; p_r – звуковое давление зеркально отраженной волны; R_p – коэффициент отражения звука от поверхности земли. Для монохроматического излучения разность фаз прямой и отраженной волны

$$\Delta\varphi = k(r_d - r_r) + \varphi, \quad (2)$$

где φ учитывает изменение фазы волны при ее отражении от подстилающей поверхности, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

В точке приема происходит интерференция волн. В частности, когда $\Delta\varphi = 180^\circ$, регистрируемое звуковое давление будем иметь минимальное значение. В общем случае, положение экстремумов (максимумов и минимумов) в спектре принятого сигнала будет зависеть от частоты, геометрии распространения звука и коэффициента отражения звуковой волны от подстилающей поверхности, который можно записать в комплексном виде



Рис. 1. Геометрия приземного распространения звука

$$R_p = |R_p| \cdot e^{i\varphi}. \quad (3)$$

Так как обычно реальный участок земной поверхности представляет собой сложную структуру, у которой трудно определить толщину отражающего слоя, то в целях упрощения земную поверхность представляют в виде слоя полубесконечной толщины с локально отражающей граничной поверхностью. В этом случае коэффициент отражения записывается в виде

$$R_p(\varphi) = \frac{\sin \varphi - \frac{Z_{\text{air}}}{Z_{\text{ground}}}}{\sin \varphi + \frac{Z_{\text{air}}}{Z_{\text{ground}}}}, \quad (4)$$

где φ – угол отражения отраженной волны от поверхности.

Для сферической звуковой волны как прямая, так и отраженная волна будут претерпевать дополнительное ослабление. Величину данного ослабления можно выразить через поле в точке приема, по аналогии с теорией электромагнитных волн, которое записывается в виде [5, 6, 11]

$$\frac{p}{p_0} = \frac{1}{r_d} e^{-i \cdot k \cdot r_d} + \frac{R_p}{r_r} e^{-i \cdot k \cdot r_r} + (1 - R_p) \frac{F(w)}{r_r} e^{-i \cdot k \cdot r_r}, \quad (5)$$

где p – звуковое давление в точке приема; p_0 – уровень звукового давления источника, измеренного на расстоянии 1 м; r_d и r_r – расстояния от источника до приемника и от мнимого источника до приемника соответственно; $F(w)$ – коэффициент поверхностных потерь.

Первый член уравнения (5) описывает прямую волну, распространяющуюся от источника к приемнику. Второй член уравнения описывает отраженную волну. Первые два члена определяют решение для плоской волны, основное ослабление которой возникает при $\sin \varphi \ll Z_{\text{air}} / Z_{\text{ground}}$.

Третий член уравнения описывает поверхностную волну, которая показывает различия между отраженной плоской волной и сферической.

Коэффициент поверхностных потерь, описывающий взаимодействие сферического волнового фронта падающего излучения с плоской подстилающей поверхностью, записывается в виде [4–6, 13]

$$F(w) = 1 + 2 \cdot i \cdot (\pi \cdot w)^{1/2} e^{-w} \int_{-i \cdot w^2}^{\infty} e^{-u^2} du, \quad (6)$$

где w – численное расстояние, которое задается в виде

$$w^2 = \frac{2 \cdot i \cdot k \cdot r_r}{(1 - R_p)^2 \cos^2 \phi} \frac{\left(\sin \phi + \frac{Z_{\text{air}}}{Z_{\text{ground}}} \right)^2}{\left(1 + \sin \phi \frac{Z_{\text{air}}}{Z_{\text{ground}}} \right)}. \quad (7)$$

В допущении локально-отражающей граничной поверхности выражение (7) упрощается [5]:

$$w^2 = \frac{i \cdot k \cdot r_r}{2} \frac{\left(\sin \phi + \frac{Z_{\text{air}}}{Z_{\text{ground}}} \right)^2}{\left(1 + \sin \phi \frac{Z_{\text{air}}}{Z_{\text{ground}}} \right)}. \quad (8)$$

Для коротких трасс и при высоких значениях импеданса подстилающей поверхности ($|w| < 1$) выражение (6) имеет вид

$$F(w) = 1 + i\sqrt{\pi} \cdot w \cdot e^{-w^2}. \quad (9)$$

Для длинных трасс и при малых значениях импеданса поверхности ($|w| > 1$)

$$F(w) = 2i\sqrt{\pi} \cdot w \cdot e^{-w^2} \cdot H[-\text{Im}(w)] - \frac{1}{2 \cdot w^2}, \quad (10)$$

где $H[x]$ – ступенчатая функция Хэвисайда ($H = 1$ при $x \geq 0$, $H = 0$ при $x < 0$); $\text{Im}(w)$ – мнимая часть численного расстояния w . Подставляя (9) и (10) в (5), можно сделать следующие выводы. При скользящем падении лучей звуковое давление от точечного источника в ближней зоне над поглощающей плоской поверхностью обратно пропорционально расстоянию, т.е. уменьшается на 6 дБ при удвоении расстояния. В дальней зоне звуковое давление обратно пропорционально квадрату расстояния до источника, т.е. уменьшается на 12 дБ при удвоении расстояния [6, 10].

Функция Хэвисайда в (10) дает существенный вклад для расстояний $r > 50$ м и частот $f < 300$ Гц при распространении над поверхностями с низким значением импеданса, например над травяным покровом. При подстановке этого члена в (5) он дает поверхностную волну, спадающую пропорционально корню квадратному из расстояния и экспоненциально уменьшающуюся с высотой над поверхностью земли.

Значение ослабления звука за счет влияния поверхности земли получается из выражения (5):

$$\alpha_{\text{ground}} = 20 \lg \left| 1 + \frac{r_d}{r_r} Q \cdot e^{i \cdot k(r_r - r_d)} \right| \text{ [дБ]}, \quad (11)$$

где $Q = R_p + (1 - R_p)F(w)$.

Выражение (11) позволяет рассчитать ослабление приземной звуковой волны, если известен импеданс земной поверхности, в свою очередь, зависящий от частоты звукового излучения и типа подстилающей поверхности.

Модели импеданса земной поверхности

Акустический импеданс (волновое сопротивление) среды определяется её структурой и упругостью (жесткостью). Поскольку свойства подстилающих поверхностей довольно разнообразны, возникают трудности в создании и использовании моделей акустического импеданса. Их разработка изначально была основана на результатах исследования акустических свойств различных

материалов, и только потом они стали применяться в расчетах характеристик звуковых волн при приземном распространении.

Существует описание различных моделей акустического импеданса для пористых материалов [5], свойства которых определяются двумя параметрами – характеристическим импедансом поверхности и коэффициентом распространения. Первый из параметров, определяющий изменения как амплитуды, так и фазы волны при отражении, может быть записан в комплексном виде следующим образом:

$$Z_c = R + i \cdot X, \tag{12}$$

где R – реальная составляющая импеданса; X – мнимая составляющая импеданса.

Коэффициент распространения, обычно используемый в случаях, когда пористая поверхность имеет некоторую толщину и граничит с жесткой поверхностью, задается в виде

$$\gamma = \alpha + i \cdot \beta, \tag{13}$$

где α – коэффициент ослабления (затухания); β – коэффициент фазы.

На практике, в расчетах приземного распространения звука широко применяется модель акустического импеданса Делани и Безли [13], которая была разработана на основе исследований свойств стекловаты в 70-х годах прошлого столетия. В дальнейшем Мики [14] модифицировал данную модель.

Для модели импеданса Делани – Безли, как и для модели Мики, реальную и мнимую часть характеристического сопротивления можно записать так:

$$R = \rho_0 \cdot c_0 \left(1 + a \left(\frac{f}{\sigma} \right)^b \right), \quad X = -\rho_0 \cdot c_0 \left(c \left(\frac{f}{\sigma} \right)^d \right), \tag{14}$$

где ρ_0 – плотность воздуха, кг/м³; c_0 – скорость звука в воздухе, м/с; σ – статическое сопротивление воздушному потоку, Н · с/м⁴.

Коэффициенты α и β для расчета коэффициента распространения для рассматриваемых двух моделей имеют вид

$$\alpha = \frac{w}{c_0} p \left(\frac{f}{\sigma} \right)^q, \quad \beta = \frac{w}{c_0} \left(1 + m \left(\frac{f}{\sigma} \right)^s \right). \tag{15}$$

Значение коэффициентов a , c , p , m , а также значение показателя степени b , d , q и s для моделей импеданса Делани – Безли и Мики приведены в табл. 1 и 2.

Как утверждается в работе [14], модель импеданса Делани – Безли можно эффективно использовать в интервале значений отношения $0.01 \leq \sigma/f \leq 1$, где f – частота в Гц. Вне этого интервала при f/σ меняется показатель степени.

Таблица 1

Коэффициенты для модели импеданса Делани – Безли

Коэффициент	Коэффициент степени
$a = 0.0497$	$b = -0.754$
$c = 0.0758$	$d = -0.732$
$p = 0.169$	$q = -0.595$
$m = 0.0858$	$s = -0.700$

Таблица 2

Коэффициенты для модели импеданса Мики

Коэффициент	Коэффициент степени
$a = 0.0699$	$b = -0.632$
$c = 0.107$	$d = -0.632$
$p = 0.160$	$q = -0.618$
$m = 0.109$	$s = -0.618$

Аллард [15], используя модель импеданса Делани – Безли, записал ее как функцию параметра плотности воздуха:

$$Z_c = \rho_0 \cdot c_0 \left(1 + 0.0571 \left(\frac{\rho_0 \cdot f}{\sigma} \right)^{-0.754} - i \cdot 0.087 \left(\frac{\rho_0 \cdot f}{\sigma} \right)^{-0.732} \right); \tag{16}$$

$$\gamma_c = \frac{w}{c_0} \left(1 + 0.0978 \left(\frac{\rho_0 \cdot f}{\sigma} \right)^{-0.7} - i \cdot 0.189 \left(\frac{\rho_0 \cdot f}{\sigma} \right)^{-0.595} \right). \quad (17)$$

Модель Делани – Безли в модификации Алларда, как наиболее простая и наглядная, используется в задачах акустики особенно часто.

Другая модификация модели Делани – Безли предложена Такеши Коматсу [17]. Она более эффективна для высокоплотных поверхностей, когда $f/\sigma < 0.01 \frac{\text{М}^3}{\text{кг}}$ и низкоплотных поверхностей при $f/\sigma > 0.1 \frac{\text{М}^3}{\text{кг}}$. Параметры модели R , X , α , β задаются в виде

$$R = \rho_0 \cdot c_0 \left(1 + 0.00027 \left(2 - \lg \frac{f}{\sigma} \right)^{6.2} \right); \quad (18)$$

$$X = -\rho_0 \cdot c_0 \left(0.0047 \left(2 - \lg \frac{f}{\sigma} \right)^{4.1} \right); \quad (19)$$

$$\alpha = 0.0069 \frac{w}{c_0} \left(2 - \lg \frac{f}{\sigma} \right)^{4.1}; \quad (20)$$

$$\beta = \frac{w}{c_0} \left(1 + 0.0004 \left(2 - \lg \frac{f}{\sigma} \right)^{6.2} \right). \quad (21)$$

Помимо различных модификаций модели Делани – Безли, существуют и другие модели, описывающие свойства подстилающей поверхности. Рассмотрим некоторые из них.

Модель Хамета [18] использует теоретическую модель пористой поверхности с жестким основанием. Характеристическое сопротивление и коэффициент распространения для этой модели задаются в виде

$$Z = \frac{q}{\Omega} F_\mu^{1/2} \left(\kappa - \frac{\kappa - 1}{F_\theta} \right)^{-1/2}, \quad \frac{\gamma}{w/c} = q \cdot F_\mu^{1/2} \left(\kappa - \frac{\kappa - 1}{F_\theta} \right)^{-1/2}, \quad (22)$$

где $F_\mu = 1 + i \frac{f_\mu}{f}$; $F_\theta = 1 + i \frac{f_\theta}{f}$; $f_\mu = \frac{\Omega \cdot \sigma}{(2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot q^2)}$; $f_\theta = \frac{\sigma}{(2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot N_{Pr})}$; q^2 – структурная константа;

Ω – пористость поверхности; ρ – плотность воздуха; $N_{Pr} = 0.71$ – число Прандтля; $\kappa = 1.4$ – отношение теплоемкостей.

В работе [19], выполненной в рамках европейского проекта по распространению звука, предложено использование гибридной модели. Эта модель предполагает применять модель Делани – Безли на высоких частотах ($f > f_2$), а модель Хамета – на низких частотах ($f < f_1$). Частоты f_1 и f_2 определяются по следующим отношениям: $f_1 = \frac{0.012 \cdot \sigma}{\rho}$ и $f_2 = \frac{0.024 \cdot \sigma}{\rho}$. Для интервала

$f_1 \leq f \leq f_2$ используется линейная интерполяция. Характеристический импеданс для данной модели вычисляется по формуле

$$Z = \begin{cases} Z_H & \text{для } f < f_1, \\ \frac{f - f_1}{f_2 - f_1} Z_{DB} + \frac{f_2 - f}{f_2 - f_1} Z_H & \text{для } f_1 \leq f \leq f_2, \\ Z_{DB} & \text{для } f > f_2, \end{cases} \quad (23)$$

где Z_H – характеристический импеданс поверхности по модели Хамета (22); Z_{DB} – характеристический импеданс поверхности по модели Делани – Безли (16).

Использование различных моделей для описания акустического импеданса земной поверхности как функции от параметра σ возможно в случаях, когда рассматривается распространение звука над асфальтовыми, бетонными, песчаными и др. поверхностями или их комбинациями. В табл. 3 представлены различные модели и их параметры для различных типов подстилающих поверхностей.

Таблица 3

Модели импеданса и их параметры для различных подстилающих поверхностей [19]

Тип поверхности	Модель импеданса	Значение параметров модели
Плотный асфальт, лед, вода	Жесткая поверхность	$Z = \infty$
Пористый асфальт	Модель Хамета	$\sigma = 5000 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^4}$, $\Omega = 0.2$, $q^2 = 5$, $l = 0.04$ м
Луг, пастбище, свежеспаханная земля	Модель Делани – Безли	$\sigma = 200000 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^4}$, $l = \infty$
Лесной массив	Экспоненциальная модель	$\sigma = 8000 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^4}$, $\alpha = 25 \text{ м}^{-1}$
Снег	Модель Делани – Безли	Свежевыпавший снег/ старый снег $\sigma = 5000/30000 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^4}$
		Глубина снега: тонкий слой/ средняя глубина/ глубокий снег: $l = 0.1/0.3/1.0$ м
Смешанная поверхность (земля/ луг)	Модель Делани – Безли	Процентное содержание травы: 100/ 67/ 50/ 33/ 0 %
		$\sigma = 200000/400000/600000/1000000/\infty \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^4}$, $l = \infty$

Более сложные модели акустического импеданса существуют и для многослойных поверхностей [11].

Теоретические исследования распространения звука над подстилающей поверхностью

В случае жесткой подстилающей поверхности $\sigma = \infty$, импеданс $Z_{\text{ground}} \rightarrow \infty$ и коэффициент отражения (4) $R_p \rightarrow 1$. Из формулы (11) видно, что в данном случае ослабление, вызванное подстилающей поверхностью, зависит только от геометрии распространения звука и частоты излучения и может быть записано в виде

$$\alpha_{\text{ground}} = 20 \lg \left[1 + \frac{r_d}{r_r} e^{i \cdot k(r_r - r_d)} \right]. \quad (24)$$

Из рис. 2 видно, что коэффициент ослабления звука на низких частотах практически постоянен на всей дистанции. Это объясняется тем, что фазовый сдвиг между прямой и отраженной волной $\Delta\varphi < 180^\circ$.

Расчеты показывают, что при низком расположении источника звука и длинных трассах распространения коэффициент ослабления звука быстрее достигает стабильного состояния, независимо от частоты излучения. Данное поведение коэффициента ослабления вызвано тем, что при низкой высоте расположения источника фазовый сдвиг между прямой и отраженной волной быстрее достигает значений $\Delta\varphi < 180^\circ$ (рис. 3).

В случае распространения над пористой земной поверхностью дополнительно появляется фазовый сдвиг за счет коэффициента отражения от поверхности и фазовый сдвиг, обусловленный

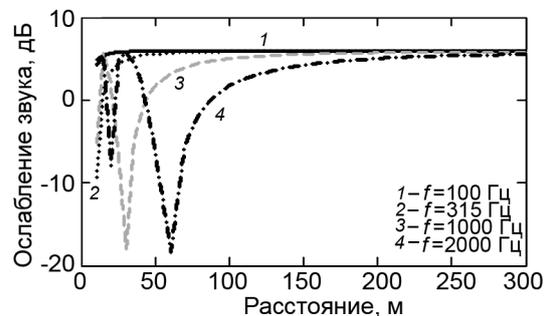


Рис. 2. Зависимость коэффициента ослабления звука от расстояния для частоты 100, 315, 1000, 2000 Гц и $\sigma = \infty$. Высота источника 1.5 м, высота приемника 1.65 м

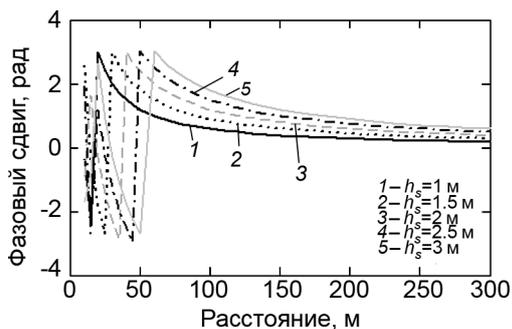


Рис. 3. Зависимость разности фаз между прямой и отраженной волной от расстояния для различных высот расположения источника. Подстилающая поверхность с $\sigma = \infty$ (твердый асфальт, лед), высота приемника 1.65 м, частота излучения 1000 Гц

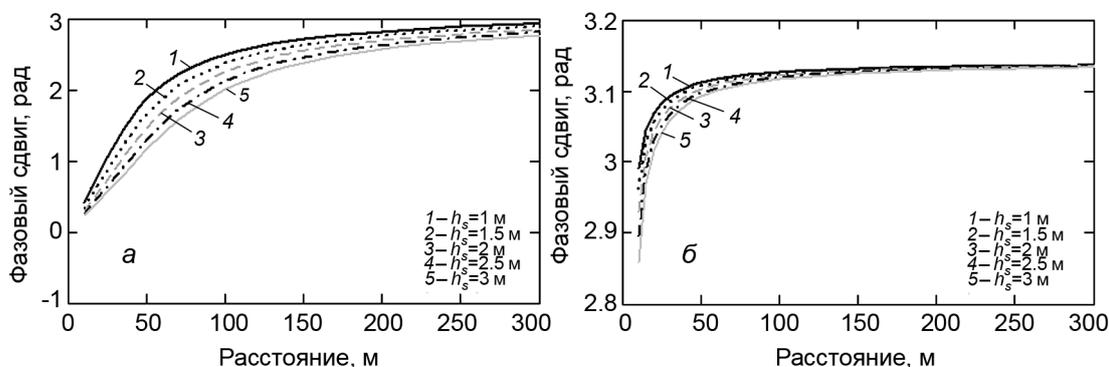


Рис. 4. Зависимость фазового сдвига $Q = R_p + (1 - R_p)F(w)$, вызванного подстилающей поверхностью с $\sigma = 1000000$ (а) и 5000 (б), от расстояния для различных высот расположения источника. Высота приемника 1.65 м. Частота излучения 1000 Гц

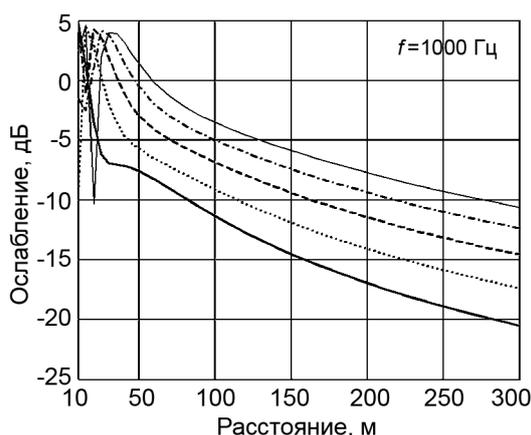


Рис. 5. Зависимость коэффициента ослабления звука для частоты 1 кГц от расстояния для различных высот расположения источника. Подстилающая поверхность с $\sigma = 1000000$ (смешанная поверхность земля – асфальт – трава, процентное содержание травы 33 %)

подстилающей поверхности. Показано, что фазовый сдвиг, образующийся при распространении звуковых волн над жесткой поверхностью, не зависит от коэффициента отражения и коэффициента поверхностных потерь. В случае, когда поверхность представляет собой пористое покрытие или

влиянием коэффициента поверхностных потерь. На рис. 4 показан фазовый сдвиг, вносимый коэффициентом отражения сферической звуковой волны $Q = R_p + (1 - R_p)F(w)$ для двух типов подстилающей поверхности.

На рис. 5 показан пример расчета коэффициента ослабления звуковых волн для различных высот расположения источника в зависимости от дальности распространения.

Сравнивая рис. 2 и 5, видим, что в случае жесткой подстилающей поверхности земли вклад, вносимый отраженной волной, приводит к усилению сигнала в точке приема, в то время как для пористой поверхности с увеличением расстояния сигнал будет претерпевать ослабление.

Также следует отметить, что вклад, вносимый коэффициентом отражения и коэффициентом поверхностных потерь, смещает интерференционные минимумы в область малых расстояний.

Заключение

Рассмотрены вопросы, связанные с ослаблением звука, вызванным подстилающей поверхностью. Приведены различные модели акустического импеданса земной поверхности, в частности различные модификации модели импеданса Делани – Безли. На основе приведенных теоретических данных произведены расчеты ослабления звука за счет подстилающей поверхности и оценено влияние характеристик последней.

Проведена теоретическая оценка влияния различных компонент, входящих в формулу (5), на итоговое значение ослабления звука за счет

покрыто слоем с мягким отражающим покровом, коэффициент $Q = R_p + (1 - R_p)F(w)$ вносит дополнительный фазовый сдвиг, стремящийся к 180° на больших расстояниях. Скорость роста данного фазового сдвига зависит от типа подстилающей поверхности. Рост тем сильнее, чем ниже характеристический импеданс подстилающей поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Embleton T.F.W., Piercy J.E., and Olson N. // JASA. – 1976. – V. 59. – No. 2. – P. 267–277.
2. Piercy J.E., T. Embleton, and Sutherland L. // JASA. – June 1977. – V. 61(6). – P. 1403–1418.
3. Delany M.E. // Acustica. – 1977. – V. 38. – P.201–223.
4. Albert D.G. // J. Acoust. Soc. Am. – 2003. – V. 113. – No. 5. – P. 2495–2500.
5. Красненко Н.П., Бочкарев Н.Н. Особенности приземного распространения звуковых волн. – Томск, 1985. – 66 с. / Деп. в ВИНТИ № 501-B86.
6. Красненко Н.П., Шаманаева Л.Г. // Оптика атмосферы и океана. – 1995. – Т. 8. – № 5. – С. 1517–1526.
7. Красненко Н.П. // Сб. трудов XV сессии Российского акустического общества «Акустические измерения. Ультразвук и ультразвуковые технологии. Атмосферная акустика. Акустика океана». – М.: ГЕОС, 2004. – Т. 2. – С. 97–102.
8. Krasnenko N.P. // Proc. SPIE. – 2005. – V. 6160. – Part 2. – P. 1–12.
9. Красненко Н.П. // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2013. – № 2 (22). – С. 86–95.
10. Attenborough K. // Appl. Acoustics. – 1988. – V. 24. – P. 289–319.
11. Attenborough K., Li K.M., and Horoshenkov K. Predicting Outdoor Sound. – London; New York: Taylor & Francis, 2007. – 441 p.
12. Parkin P.H. // Proc. Inst. Acoustics. – 1978. – No. 1. – P. 7–31.
13. Delany M.E. and Bazley E.N. // Appl. Acoust. – 1970. – No. 3. – P. 105–116.
14. Miki Y. // J. Acoust. Soc. Jpn. (E). – 1990. – No. 11. – P. 19–24.
15. Allard J.E. Propagation of Sound in Porous Media. – London: Elsevier Applied Science, 1993.
16. Price M.A., Attenborough K., and Heap N.W. // J. Acoust. Soc. Am. – 1988. – V. 84. – No. 5. – P. 1836–1844.
17. Takeshi Komatsu // Acoust. Sci. Tech. – 2008. – V. 29. – No. 2. – P. 121–129.
18. Berengier M.C., Stinson M.R., Daigle G.A., and Hamet J.F. // J. Acoust. Soc. Am. – 1997. – V. 101. – P. 155–162.
19. Defrance J., Salomons E., Noordhoek I., et al. // Acta Acust. United Acust. – 2007. – V. 93. – P. 213–227.

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 17.10.13.

**Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

***Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия
E-mail: krasnenko@imces.ru; rakov@imces.ru; sima@iao.ru