

АКУСТООПТИЧЕСКИЕ И РАДИООПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 534.2; 551.501.796

**Экспериментальные и теоретические исследования  
приземного распространения акустического излучения  
в атмосфере**

**В.В. Белов<sup>1</sup>, Ю.Б. Буркатовская<sup>2,3</sup>, Н.П. Красненко<sup>4,5</sup>,  
А.С. Раков<sup>4,5</sup>, Д.С. Раков<sup>3,4</sup>, Л.Г. Шаманаева<sup>1,2\*</sup>**

<sup>1</sup> *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

<sup>2</sup> *Национальный исследовательский Томский государственный университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36*

<sup>3</sup> *Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30*

<sup>4</sup> *Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН  
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3*

<sup>5</sup> *Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40*

Поступила в редакцию 4.09.2017 г.

Экспериментально и теоретически исследован процесс приземного распространения монохроматического акустического излучения с частотой 300, 1000, 2000 и 3150 Гц вдоль приземной трассы длиной до 100 м и для различных высот расположения источника и приемника звука. Эксперимент проводился на специально созданном стенде на полигоне ИМКЭС СО РАН. Проанализирована зависимость величины регистрируемого звукового давления от длины трассы распространения и начальной мощности сигнала. Теоретический анализ проведен методом Монте-Карло с использованием разработанного авторами алгоритма локальной оценки. Проведено сравнение экспериментальных и теоретических результатов, показано их удовлетворительное согласие, что свидетельствует об эффективности предложенного алгоритма и о возможности его использования для прогноза приземного распространения звука.

*Ключевые слова:* атмосферная акустика, приземное распространение звука, метод Монте-Карло, поглощение, рефракция, рассеяние звука атмосферной турбулентностью; atmospheric acoustics, near-ground propagation of acoustic radiation, Monte Carlo method, absorption, refraction, sound scattering by atmospheric turbulence.

### Введение

Исследование распространения звука в приземном слое атмосферы представляет особый интерес для акустики окружающей среды, связанный с прогнозом распространения шума в атмосфере и контролем уровня шума в городских условиях. Особенности приземного распространения звуковых волн рассмотрены в [1, 2], где отмечено, что на характеристики волн влияет множество факторов, включая расходимость излучения источника, состояние подстилающей поверхности и ее рельеф, высоты расположения источника и приемника, длину трассы распространения, метеорологические условия, молекулярное и классическое поглощения, рефракцию

и рассеяние звука на атмосферной турбулентности, которые необходимо учитывать при разработке различных прогностических моделей. Рефракция звука обусловлена градиентами средней температуры и скорости ветра. Молекулярное и классическое поглощения звука носят экспоненциальный характер и зависят от температуры и влажности воздуха. Рассеяние звука на флуктуациях атмосферной температуры и скорости ветра, которое обуславливает его дополнительное экспоненциальное турбулентное ослабление и наиболее интенсивно проявляется в приземном слое атмосферы в условиях атмосферной неустойчивости, наименее изучено [3].

В данной работе представлены результаты как натуральных измерений интенсивности звука от мощного направленного источника при распространении вдоль коротких приземных трасс в контролируемых метеоусловиях, так и решения задачи о распространении акустического излучения методом Монте-Карло. Исследована зависимость интенсивности принятого сигнала от длины звуковой волны, высот

\* Владимир Васильевич Белов (belov@iao.ru); Юлия Борисовна Буркатовская (trasey@inbox.ru); Николай Петрович Красненко (krasnenko@imces.ru); Александр Сергеевич Раков (dipol@ngs.ru); Денис Сергеевич Раков (rds@trui.ru); Людмила Григорьевна Шаманаева (sima@iao.ru).

расположения источника и приемника звука, длины трассы распространения, величины внешнего масштаба атмосферной турбулентности и альбедо подстилающей поверхности. Проведено сравнение полученных теоретических результатов с данными экспериментальных исследований и результатами расчетов с использованием модели импеданса подстилающей поверхности Делани–Бэзли.

## Результаты экспериментальных исследований

Натурные эксперименты по распространению звукового сигнала над твердой однородной подстилающей поверхностью с травяным покровом проводились на трассе протяженностью до 100 м на специально созданном стенде на полигоне ИМКЭС СО РАН. В качестве источника звукового излучения использовалась мощная акустическая антенная решетка [4] с развиваемым звуковым давлением до 155 дБ/м. Внешний вид решетки показан на рис. 1; ее амплитудно-частотная характеристика – на рис. 2. Источник и приемник звука размещались на высоте 3,5 м.

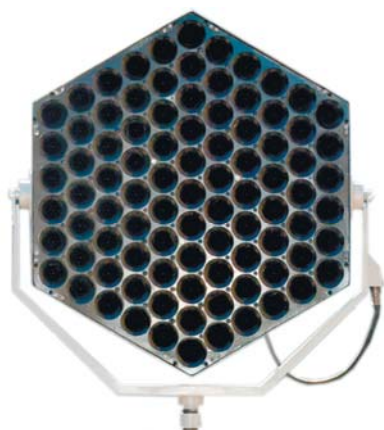


Рис. 1. Внешний вид 91-элементной антенной решетки

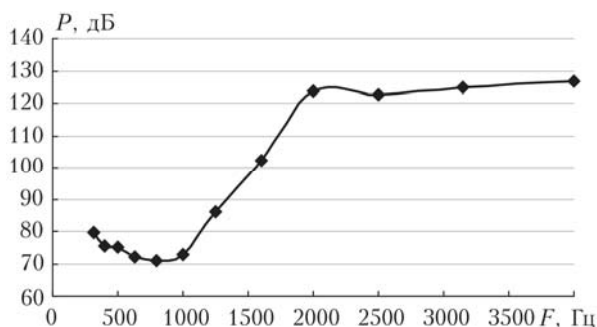


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика антенной решетки на расстоянии 20 м от источника

Уровень звукового давления на трассе измерялся шумомером 1-го класса точности серии «Экофизика 110А» на расстояниях 10; 17; 25; 50; 75; 100 м от источника на частотах 2000; 2500; 3150 Гц. Ширина диаграммы направленности антенны по уровню –3 дБ на частоте 2000 Гц составляла 14°,

2500 Гц – 12°, 3150 Гц – 10°. Температура воздуха была 20 °С, влажность 52%, атмосферное давление 747 мм рт. ст. Подстилающая поверхность представляла собой травяной покров высотой 0,5–0,7 м. Для обработки экспериментальных данных применялось специальное программное обеспечение, поставляемое к шумомеру. Дополнительно использовались стандартные средства Windows и Microsoft Excel. Результаты измерения интенсивности звука в зависимости от расстояния до приемника показаны на рис. 3 (цв. вкладка).

Анализ полученных результатов показал, что они хорошо аппроксимируются полиномом третьей степени

$$I(L) = AL^3 + BL^2 + CL + D. \quad (1)$$

Коэффициенты аппроксимации для каждого измерения представлены в таблице.

Коэффициенты аппроксимации интенсивности звука в формуле (1)

Уровень мощности источника P, дБ/м	A	B	C	D
<i>F</i> = 2000 Гц				
142	$9,25 \cdot 10^{-5}$	-0,01	$-7,89 \cdot 10^{-3}$	120,335
141	$7,30 \cdot 10^{-5}$	$-8,26 \cdot 10^{-3}$	-0,12	119,415
140	$7,70 \cdot 10^{-5}$	$-9,04 \cdot 10^{-3}$	-0,09	116,43
138	$5,58 \cdot 10^{-5}$	$-5,86 \cdot 10^{-3}$	-0,19	113
137	$-2,57 \cdot 10^{-6}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$	-0,59	113
134	$2,70 \cdot 10^{-5}$	$-2,2 \cdot 10^{-3}$	-0,34	103
<i>F</i> = 2500 Гц				
147	$9,25 \cdot 10^{-5}$	$-5,95 \cdot 10^{-4}$	-0,48	128,434
146	$7,30 \cdot 10^{-5}$	0,02	-1,22	131,325
145	$7,70 \cdot 10^{-5}$	0,02	-1,29	127,818
144	$5,58 \cdot 10^{-5}$	0,03	-1,52	126,48
142	$-2,57 \cdot 10^{-6}$	0,03	-1,61	123,017
139	$2,70 \cdot 10^{-5}$	0,03	-1,54	114,596
<i>F</i> = 3150 Гц				
152	$-9,36 \cdot 10^{-4}$	0,017	-1,15	130
151	$-1,93 \cdot 10^{-4}$	0,038	-2,38	143
150	$-1,84 \cdot 10^{-4}$	0,036	-2,22	138
148	$-1,84 \cdot 10^{-4}$	0,036	-2,24	134
147	$-2,18 \cdot 10^{-4}$	0,041	-2,38	128
144	$-1,93 \cdot 10^{-4}$	0,036	-2,11	119

## Теоретические оценки методом Монте-Карло

При расчетах по методу Монте-Карло рассматривалась 500-метровая плоскостратифицированная модель турбулентной атмосферы, разделенной на 25 слоев  $z_j$ ,  $j = 1, \dots, 25$ , с постоянными внутри этих слоев коэффициентами классического ( $\sigma_{cl}$ ) и молекулярного поглощения ( $\sigma_{mol}$ ) и рассеяния на турбулентных флуктуациях температуры ( $\sigma_T$ ) и скорости ветра ( $\sigma_V$ ) и индикатрисами рассеяния на турбулентных флуктуациях температуры ( $g_T(\theta)$ ) и скорости ветра ( $g_V(\theta)$ ) [5–7]. Подстилающая поверхность предполагалась как абсолютно поглощающей (коэффициент отражения излучения (альбедо) подстилающей поверхности  $\Lambda = 0$ ), так и абсолютно отражающей ( $\Lambda = 1$ ). Расчеты проводились

для неустойчивой атмосферной стратификации при слабом ветре. Поглощение звука в атмосфере рассчитывалось по методу [8]. Внешние масштабы температурной ( $L_{0T}$ ) и динамической турбулентности ( $L_{0V}$ ) задавались аналитическими соотношениями, предложенными в [9] для безоблачной (поверхностный тепловой поток  $H_s = 200 \text{ Вт/м}^2$ ) и облачной атмосферы ( $H_s = 40 \text{ Вт/м}^2$ ). Источник непрерывного акустического излучения с заданной мощностью  $P$  и углом расходимости  $\phi$  в зависимости от частоты излучения помещался на высоте  $z_s = 3,5 \text{ м}$  над подстилающей поверхностью. Приемник излучения также располагался на высоте  $z_r = 3,5 \text{ м}$  над подстилающей поверхностью.

Общая схема алгоритма прямого статистического моделирования траекторий движения фононов в турбулентной атмосфере описана в [5, 6]. В настоящей работе использовалась модификация метода Монте-Карло для расчета локальных характеристик излучения в точке приема [7], в соответствии с которой в каждой  $i$ -й точке рассеяния вычисляется плотность вероятности того, что данная траектория завершится в заданной  $s$ -й точке пространства. Плотность вероятности этого события с точностью до постоянной величины есть

$$p = v_i \exp(-\tau_{i,s}) g(\omega_i, \omega_s) / \rho_{i,s}^2, \quad (2)$$

где  $v_i$  — статистический вес фонона;  $\rho_{i,s}$  — геометрическое расстояние между точками  $i$  и  $s$ ;  $\tau_{i,s}$  — безразмерная длина отрезка, соединяющего точки пространства  $i$  и  $s$ , т.е.

$$\tau_{i,s} = \int_{r_i}^{r_s} (\sigma_{cl}(r) + \sigma_{mol}(r) + \sigma_T(r) + \sigma_V(r)) dr;$$

$g(\omega_i, \omega_s)$  — плотность вероятности того, что рассеяние фонона из точки  $i$  произойдет в направлении точки  $s$ . Расчеты проводились для  $10^6$ – $10^7$  фоновых историй, что обеспечивало дисперсию полученных результатов на уровне 3–10%.

Ниже представлены результаты расчетов методом Монте-Карло для случая абсолютно поглощающей подстилающей поверхности, высоты расположения источника  $z_s = 3,5 \text{ м}$ , угла расходимости излучения источника  $\phi = 14^\circ$  и высоты расположения приемника  $z_r = 3,5 \text{ м}$ . На рис. 4 приведены статистические оценки интенсивности однократно ( $I_{ss}$ ) и многократно рассеянного ( $I_{ms}$ ) акустического излучения частотой 2000 ( $a, б$ ) и 2500 Гц ( $в, г$ ) в зависимости от длины трассы распространения  $L$  в условиях слабого ветра  $V = 1 \text{ м/с}$  и неустойчивой безоблачной (пунктирные кривые) и облачной атмосферы при слабой турбулентности и стратификации, близкой к нейтральной (сплошные кривые). Из сравнения кривых следует, что атмосферная турбулентность существенно влияет на процесс распространения звука в приземной атмосфере.

Видно, что многократное рассеяние вносит основной вклад в излучение, регистрируемое детектором. Кроме того, оно затухает с расстоянием медленнее, чем однократно рассеянное. Также отчетливо прослеживается влияние метеоусловий. На частоте 2000 Гц интенсивность излучения уменьшается примерно в 5 раз при увеличении длины трассы распространения с 17 до 50 м; на частоте 2500 Гц она уменьшается примерно в 8 раз.

Влияние высоты расположения приемника  $z_r$  и альbedo подстилающей поверхности на мощность принятого сигнала иллюстрирует рис. 5.

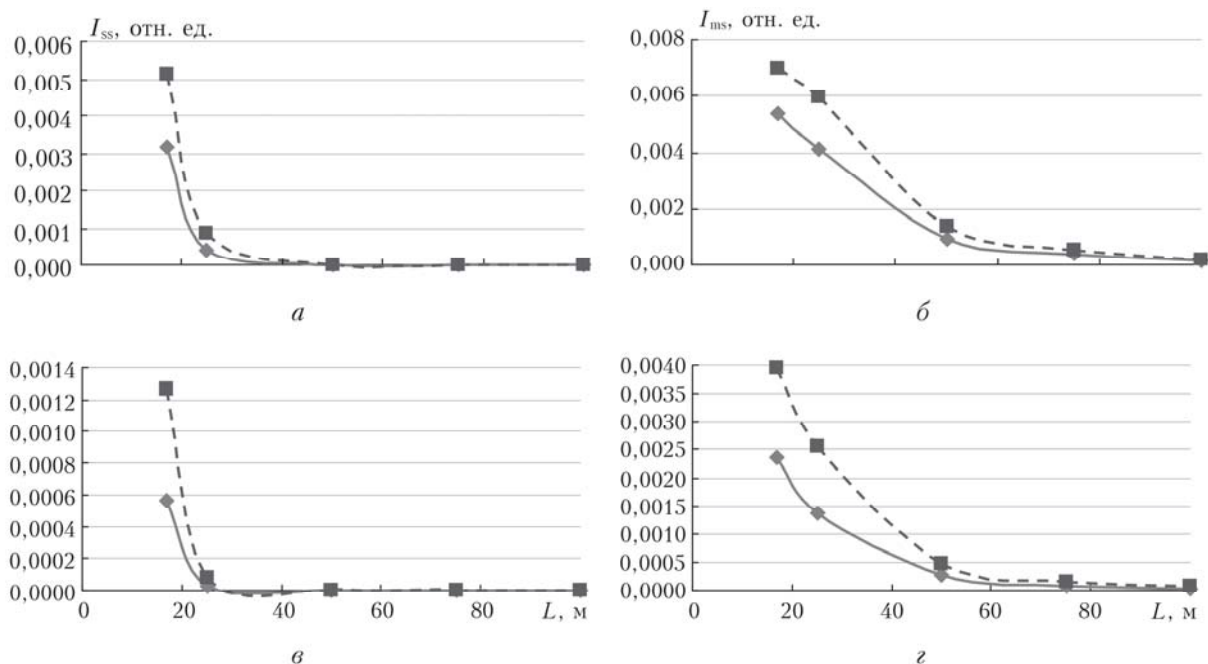


Рис. 4. Статистические оценки интенсивности  $I$  акустического излучения на частотах 2000 ( $a, б$ ) и 2500 Гц ( $в, г$ ) в зависимости от длины трассы распространения  $L$

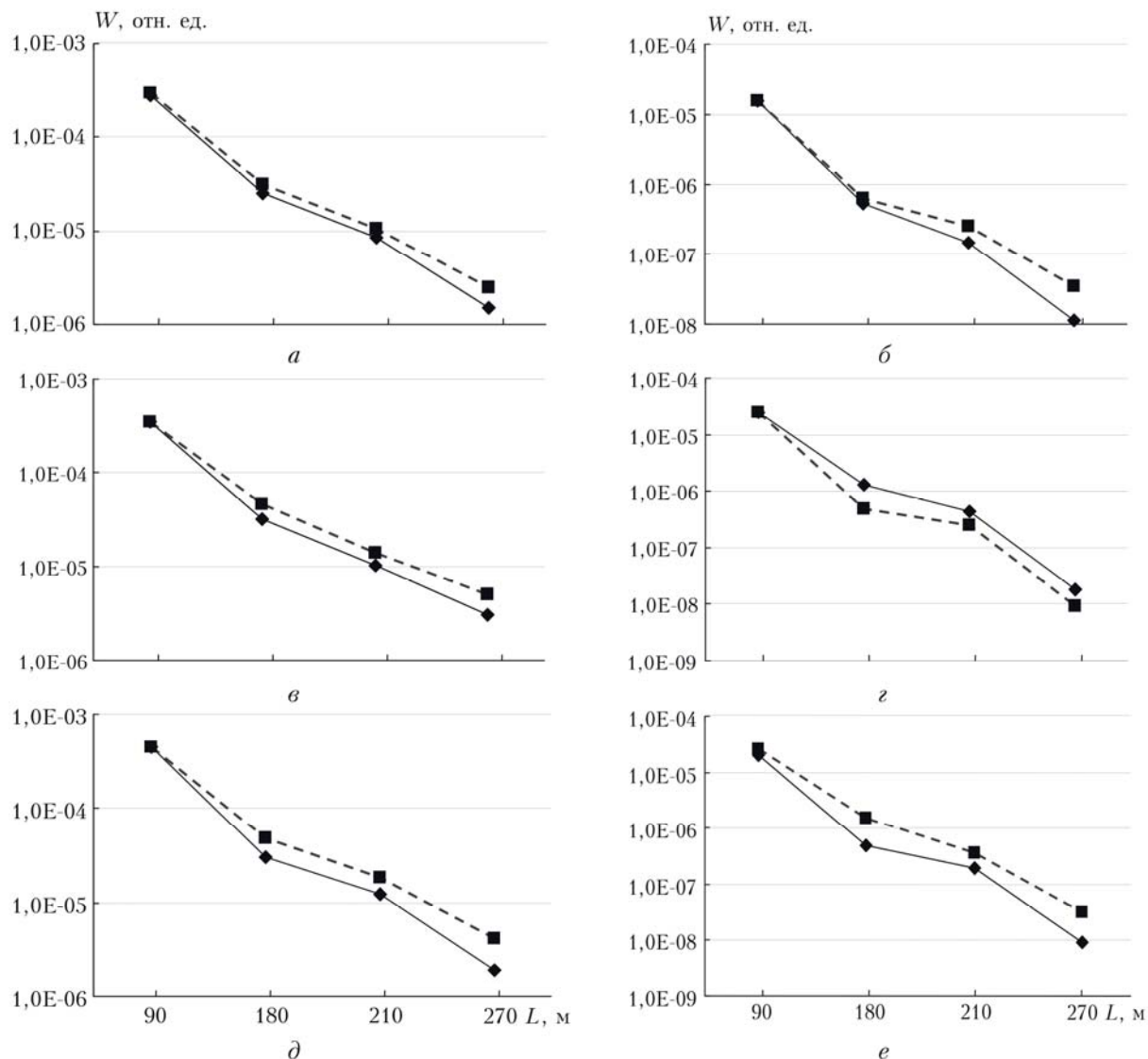


Рис. 5. Теоретическая зависимость мощности  $W$  принятого акустического сигнала от длины трассы распространения  $L$  для звуковых частот  $F = 1000$  (а, в, д) и 2000 Гц (б, г, е); высоты расположения приемника  $z_r = 0$  (а, б), 0,5 (в, г), 1 м (д, е); абсолютно поглощающей ( $\Lambda = 0$ ) (сплошная кривая) и абсолютно отражающей поверхностей ( $\Lambda = 1$ ) (пунктирная кривая). Высота источника  $z_s = 6$  м, угол расходимости излучения источника  $\phi = 5^\circ$ , масштаб длины Монина–Обухова  $L_{MO} = -2,4$  м

Видно, что с увеличением альбедо подстилающей поверхности принимаемая мощность сигнала увеличивается. Так, на частоте 1000 Гц она возрастает в 1,65; 1,69; 2,1 раза при  $z_r = 0; 0,5; 1$  м; на частоте 2000 Гц она возрастает уже в 3,1; 5; 3,4 раза для тех же значений высоты приемника.

Метод Монте-Карло позволяет оценить влияние отдельных факторов многофакторного процесса. В нашем случае оценки показывают существенное (до 5 раз) влияние подстилающей поверхности на мощность акустического сигнала при распространении вдоль приземных трасс, а также усиление влияния альбедо поверхности с ростом звуковой частоты. При этом увеличение высоты расположения источника на 1 м приводит к росту принимаемой мощности сигнала в 1,3 и 1,7 раза для  $\Lambda = 0$  и 1 и  $F = 1000$  Гц; мощность принятого сигнала на

частоте 2000 Гц для  $\Lambda = 0$  и  $z_r = 0$  увеличивается в 2,8 раза, а для  $\Lambda = 1$  и  $z_r = 1$  м она уменьшается в 0,9 раза, что можно объяснить влиянием интерференции прямой и отраженной волн.

### Сравнение экспериментальных и теоретических результатов

Исходные данные при проведении расчетов соответствовали натурным экспериментам по распространению звуковых волн над подстилающей поверхностью. Так, на рис. 6 (цв. вкладка) приведены результаты экспериментальных измерений 7 июня 2007 г. для следующих параметров: ширина диаграммы направленности антенны по уровню  $-3$  дБ на частоте 2000 Гц, равная  $14^\circ$ , 2500 Гц –  $12^\circ$ , 3150 Гц –  $10^\circ$ ; температура воздуха  $10,4$  °С, влаж-

ность 97%, атмосферное давление 1009,3 ГПа, подстилающая поверхность – травяной покров высотой 0,5–0,7 м; высота расположения приемника указана на рисунке.

Результаты расчетов с теми же значениями параметров приведены на рис. 7 (цв. вкладка). Из сравнения экспериментальных и теоретических результатов видно, что расчетные данные хорошо воспроизводят экспериментальные. Так, рис. 6, *a* и 7, *a* показывают, что уровень звукового давления для частоты 300 Гц вначале растет с увеличением расстояния, достигает максимума на 180 м, а затем уменьшается. При этом для более высоких частот уровень звукового давления монотонно уменьшается как в эксперименте (рис. 6, *б–д*), так и по теоретическим оценкам (рис. 7, *в–е*). С ростом высоты расположения приемника уровень звукового давления растет как в том, так и в другом случае.

На рис. 8 представлены результаты сравнения экспериментальных (кривые 1, 2) и расчетных оценок доли прошедшего излучения (кривые 3, 4 с учетом вклада многократного рассеяния) для трех звуковых частот  $F = 2000$  (*a*), 2500 (*б*), и 3150 Гц (*в*).

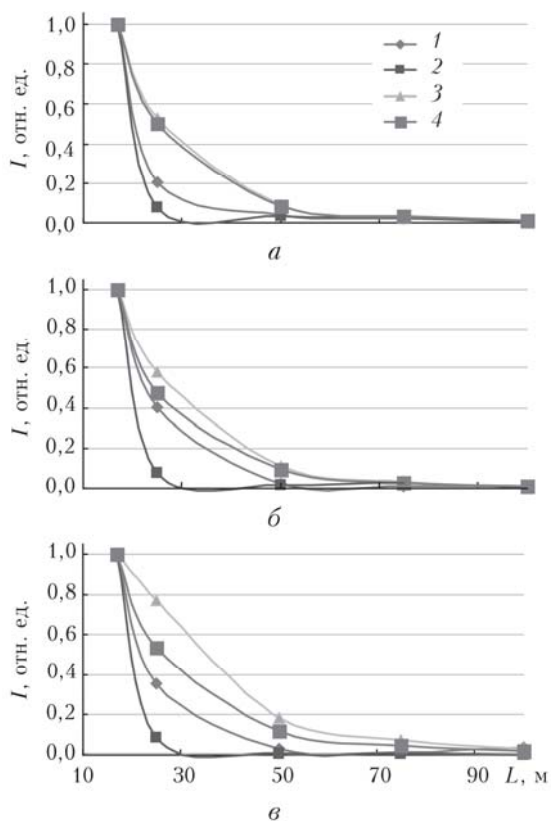


Рис. 8. Экспериментальные и теоретические оценки доли прошедшего излучения для звуковых частот 2000 (*a*), 2500 (*б*), и 3150 Гц (*в*): 1 – максимальная, 2 – минимальная мощности передатчика в эксперименте; 3 – суммарное ослабление звука при минимальной, 4 – максимальной мощности передатчика согласно расчетам методом Монте-Карло

Эксперимент показывает более сильное уменьшение доли прошедшего излучения с ростом частоты

ты. Отличие между экспериментальными и теоретическими данными уменьшается с увеличением  $L$  и ростом частоты звука: теоретические и экспериментальные оценки практически совпадают для  $F = 2500$  и 3150 Гц для  $L = 75$  и 100 м, что подтверждает эффективность предложенного авторами алгоритма.

На рис. 9 представлены экспериментальная зависимость (пунктирные кривые)  $P$  для этих звуковых частот от  $L$  и результаты аналитических расчетов (сплошные кривые) для подстилающей поверхности с импедансом, заданным по модели Делани–Бэзли [2, 10].

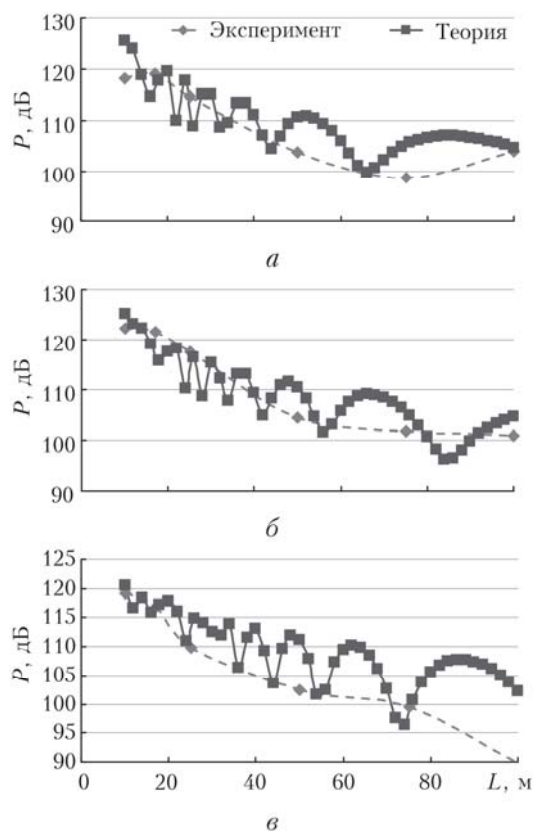


Рис. 9. Экспериментальная зависимость звукового давления (пунктирные кривые) при распространении акустического излучения на частотах 2000 (*a*), 2500 (*б*), и 3150 Гц (*в*) над подстилающей поверхностью в зависимости от длины трассы распространения  $L$  (высоты расположения источника и приемника излучения  $z_s = z_r = 3,5$  м). Результаты аналитических расчетов с использованием модели импеданса Делани–Бэзли (сплошные кривые)

Согласно рис. 9 результаты теоретического расчета приземного распространения звука с использованием модели импеданса Делани–Бэзли хорошо коррелируют и неплохо совпадают с экспериментальными данными.

### Заключение

В работе методом Монте-Карло решена задача о распространении монохроматического акустиче-

ского излучения вдоль приземной трассы с учетом вклада многократного рассеяния, рефракции звука и отражения поверхностью земли для облачной и безоблачной моделей атмосферы в зависимости от длины трассы распространения для частот звука 2000 и 2500 Гц и фиксированных высот источника и приемника. Показано, что многократное рассеяние звука дает основной вклад в излучение, регистрируемое детектором. Кроме того, многократно рассеянное излучение затухает с расстоянием медленнее, чем однократно рассеянное. На частоте 2000 Гц интенсивность излучения уменьшается примерно в 5 раз при увеличении длины трассы распространения с 17 до 50 м; на частоте 2500 Гц – примерно в 8 раз. Прослеживается влияние метеословий. Представлены данные натурных измерений величины звукового давления. Проведено их сравнение с результатами аналитического расчета для подстилающей поверхности, импеданс которой задан моделью Делани–Бэзли. Сравнение показало удовлетворительное согласие. Для проведения статистических оценок в качестве исходных параметров были взяты условия натурных экспериментов по распространению звуковых волн над подстилающей поверхностью.

Работа проведена при частичной финансовой поддержке по проекту № 5.3279.2017/4.6 государственного задания Минобрнауки РФ и гранта РФФИ № 16-01-00121а. Результаты моделирования были получены в рамках программы повышения конкурентоспособности ТПУ.

1. *Salomons E.M.* Computational atmospheric acoustics. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 2001. 335 p.

2. *Attenborough K., Li K.M., Horoshenkov K.* Predicting outdoor sound. London, New York: Taylor & Francis, 2007. 441 p.
3. *Wilson D.K., Pettit C.L., Ostashev V.E.* Sound Propagation in the atmospheric boundary layer // *Acoust. Today*. 2015. V. 11, N 2. P. 44–53.
4. *Красненко Н.П., Кудрявцев А.Н., Раков А.С., Раков Д.С.* Исследование характеристик мощной излучающей акустической антенной решетки // *Докл. ТУСУР*. 2015. № 4 (38). С. 47–51.
5. *Белов В.В., Буркатовская Ю.Б., Красненко Н.П., Шаманаева Л.Г.* Применение метода Монте-Карло в атмосферной акустике // *Оптика атмосф. и океана*. 2011. Т. 24, № 12. С. 1072–1077.
6. *Shamanaeva L.G., Belov V.V., Burkatovskaya Yu.B., Krasnenko N.P.* Statistical simulation of acoustic radiation propagation in the lower atmosphere by the Monte Carlo method // *Proc. SPIE*. 2012. V. 8696. P. 86960C.
7. *Шаманаева Л.Г., Белов В.В., Буркатовская Ю.Б., Красненко Н.П., Тарасенков М.В.* Программа статистического моделирования процесса переноса акустического излучения вдоль горизонтальных трасс в движущейся турбулентной поглощающей и рассеивающей атмосфере // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2016619427 от 18.08.2016. Правообладатель: ИОА СО РАН, ИМКЭС СО РАН (RU).
8. *Method for calculation of the absorption of sound by the atmosphere.* ANSI S1.26-1995. New York: American National Standard Institute. 1995.
9. *Ostashev V.E., Wilson D.K.* Relative Contributions from temperature and wind velocity fluctuations to the statistical moments of a sound field in a turbulent atmosphere // *Acta Acust. Acust.* 2000. V. 86, N 2. P. 260–268.
10. *Красненко Н.П., Раков А.С., Раков Д.С., Шаманаева Л.Г.* Влияние импедансных свойств земной поверхности на ослабление звука при приземном распространении // *Изв. вуз. Физика*. 2014. Т. 57, № 1. С. 92–99.

*V.V. Belov, Yu.B. Burkatovskaya, N.P. Krasnenko, A.S. Rakov, D.S. Rakov, L.G. Shamanaeva.*  
**Experimental and theoretical investigations of near-ground acoustic radiation propagation in the atmosphere.**

The process of near-ground propagation of monochromatic acoustic radiation at frequencies of 300, 1000, 2000, and 3150 Hz along atmospheric paths up to 100 m long is investigated experimentally and theoretically depending on altitudes of acoustic source and receiver. Experiments were performed at the experimental site of the IMCES SB RAS using a specially developed setup. The dependence of the recorded sound pressure level on the propagation path length and the initial signal power is studied. The theoretical analysis is performed by the Monte Carlo method that allows contributions of multiple scattering of acoustic radiation, refraction, and reflection by the underlying surface to the acoustic signal recorded with the detector to be taken into account for realistic models of the atmosphere. The local estimation algorithm of the Monte Carlo method developed by the authors was used for calculations. The comparison of the experimental and theoretical results shows their satisfactory agreement, which testifies to the efficiency of the suggested Monte Carlo algorithm and its applicability to the prediction of near-ground acoustic radiation propagation.

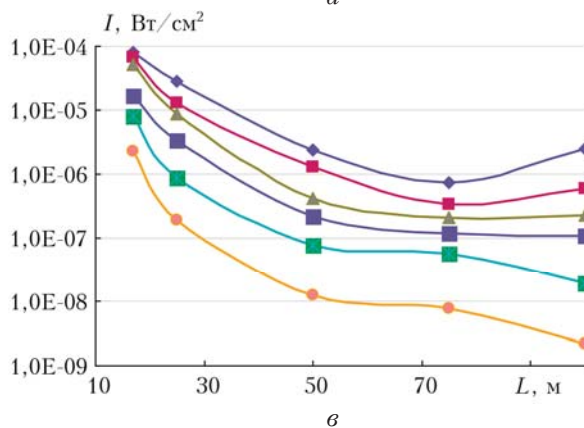
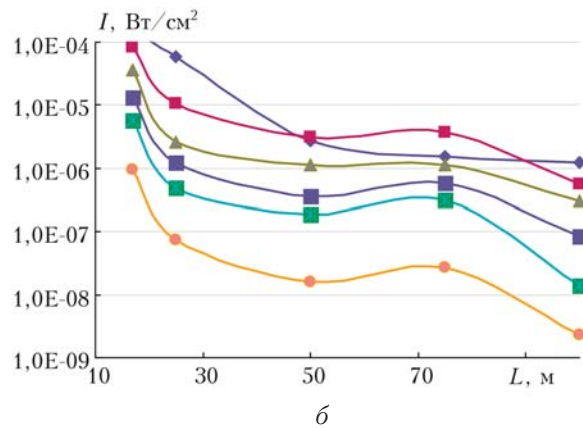
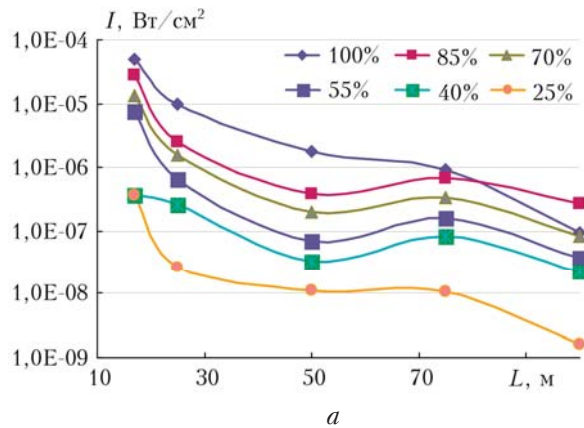


Рис. 3. Зависимость интенсивности звука  $I$  от расстояния  $L$  до приемника для звуковых частот  $F = 3150$  (а),  $2500$  (б) и  $2000$  Гц (в) и мощности источника звука, в процентах от максимального значения  $P_s = 152$  (3150 Гц),  $147$  (2500 Гц), и  $142$  дБ/м (2000 Гц)

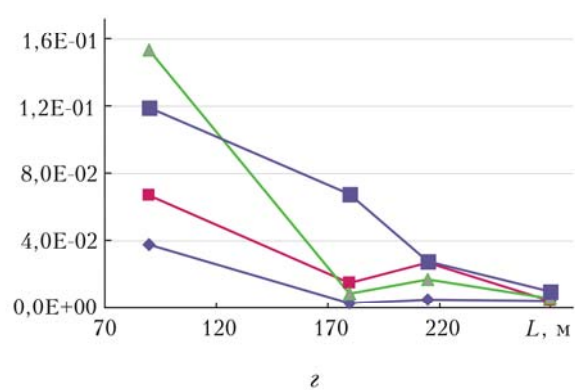
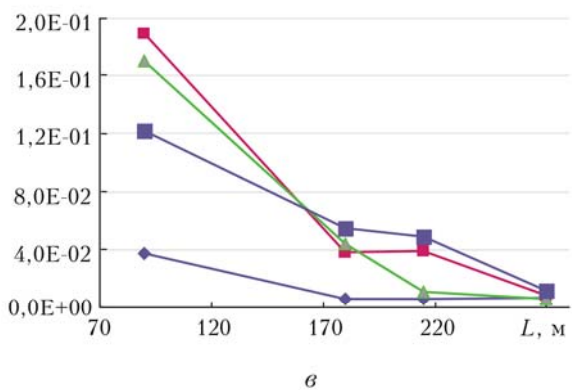
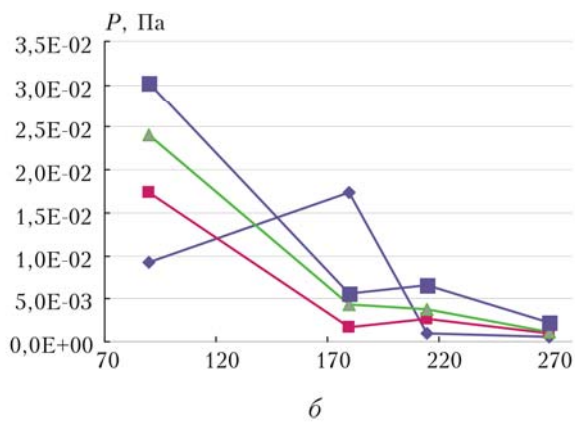
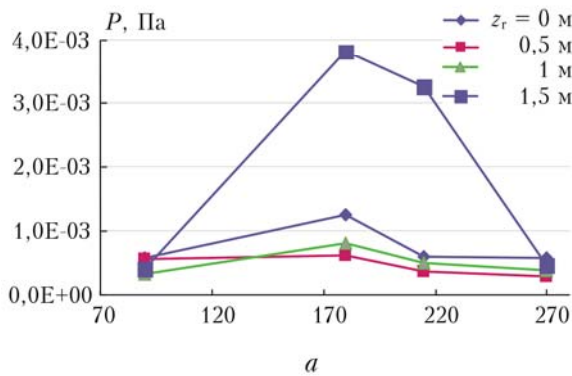


Рис. 6. Экспериментальная зависимость уровня звукового давления  $P$  от длины трассы распространения  $L$  для звуковых частот  $315$  (а),  $1000$  (б),  $2000$  (в),  $3150$  Гц (г) и различных высот расположения приемника

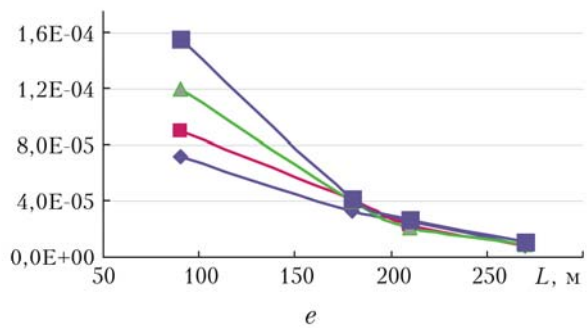
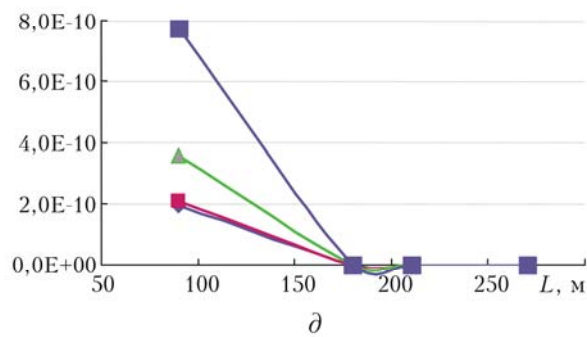
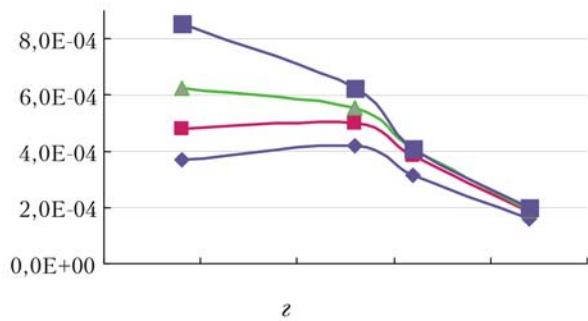
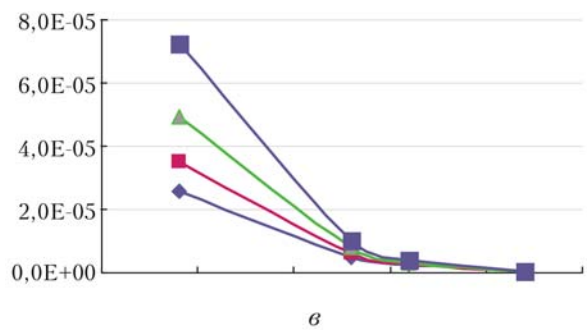
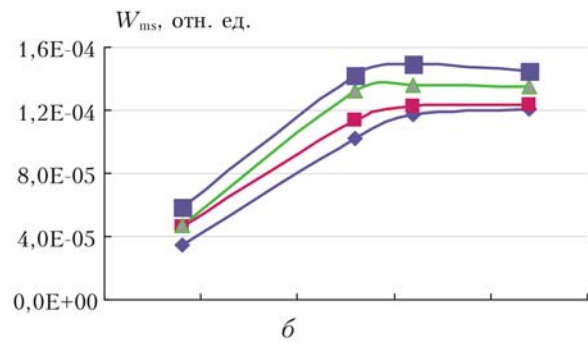
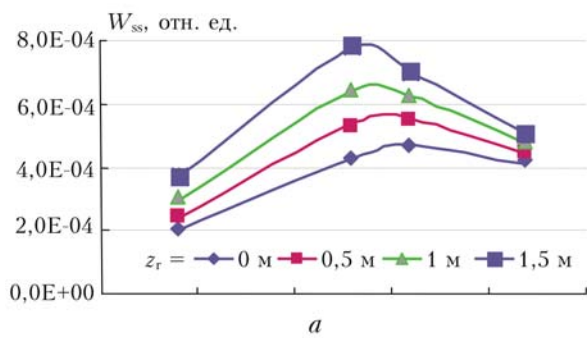


Рис. 7. Теоретические оценки уровня звукового давления для однократно  $W_{ss}$  и многократно  $W_{ms}$  рассеянного звукового сигнала, рассчитанные методом Монте-Карло для тех же значений метеопараметров и высот расположения приемника, что и в эксперименте на рис. 6, и звуковых частот 300 (*a*, *б*), 1000 (*в*, *г*) и 2000 Гц (*д*, *е*)