

Применение метода Монте-Карло в атмосферной акустике

В.В. Белов^{1,2}, Ю.Б. Буркатовская³, Н.П. Красненко^{4,5}, Л.Г. Шаманаева^{1*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

³Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634034, г. Томск, пр. Ленина, 30

⁴Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, Томск, пр. Академический, 10/3

⁵Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40

Поступила в редакцию 10.08.2011 г.

Представлен обзор работ авторов по применению метода Монте-Карло для решения задачи распространения акустического излучения через нижний 500-метровый слой плоскостратифицированной турбулентной атмосферы. Рассматривается акустическая модель атмосферы, обсуждаются структура и особенности вычислительного алгоритма метода Монте-Карло. Исследуются влияние внешнего масштаба атмосферной турбулентности на распределение интенсивности прошедшего акустического излучения в диапазоне звуковых частот 1–4 кГц, региональные и сезонные вариации вклада многократного рассеяния в интенсивность прошедшего излучения, а также влияние облачности и высоты расположения источника. Обсуждаются зависимости интенсивности прошедшего акустического излучения и вклада многократного рассеяния от частоты акустического излучения, угла расходимости источника, его высоты над поверхностью Земли, времени года и профилей атмосферных метеопараметров. Хорошее согласие рассчитанных значений суммарного ослабления звука с имеющимися экспериментальными данными подтверждает достоверность результатов статистического моделирования.

Ключевые слова: пограничный слой атмосферы, метод Монте-Карло, атмосферная акустика, распространение звуковых волн; atmospheric boundary layer, Monte Carlo method, atmospheric acoustics, propagation of acoustic waves.

Исследование распространения звука в атмосфере необходимо для целей его прогноза, определения направления на источник звука, а также для количественной интерпретации результатов акустического зондирования [1]. В реальной атмосфере на распространение звука влияет большое число факторов, основными из которых являются вертикальная стратификация атмосферы, вязкость, турбулентность, а также угловая расходимость излучения. Трудности аналитического подхода обуславливают необходимость привлечения численных методов (см., например, [2, 3]), из которых наиболее перспективным, по мнению авторов, является метод Монте-Карло, впервые использованный в [4] для статистической оценки вклада многократного рассеяния в распределение интенсивности прошедшего акустического излучения по зонам детектора в зависимости от частоты звука

и внешнего масштаба атмосферной турбулентности. Этот метод позволяет корректно учесть рассеяние звука на флуктуациях показателя преломления, обусловленных ветровыми и температурными неоднородностями, с использованием реалистичных моделей атмосферы и конкретной геометрии численного эксперимента.

В настоящей статье представлен обзор по результатам работ авторов [4–11]. Расчеты методом Монте-Карло проводились для акустической модели атмосферы, базирующейся на теоретических оценках рассеяния звука атмосферной турбулентностью, представленных в [12] для кармановской модели спектров флуктуаций атмосферной температуры и скорости ветра. При расчетах высотной зависимости коэффициентов поглощения и рассеяния звука высотные профили температуры, давления и скорости звука были взяты из стандартной модели среднеширотной летней атмосферы [13]. В вычислительном алгоритме использованы как традиционные вычислительные процедуры [14], так и разработанные в [6, 15, 16] с учетом специфики взаимодействия звука с атмосферой.

* Владимир Васильевич Белов (belov@iao.ru); Юлия Борисовна Буркатовская (tracey@inbox.ru); Николай Петрович Красненко (krasnenko@imces.ru); Людмила Григорьевна Шаманаева (sima@iao.ru).

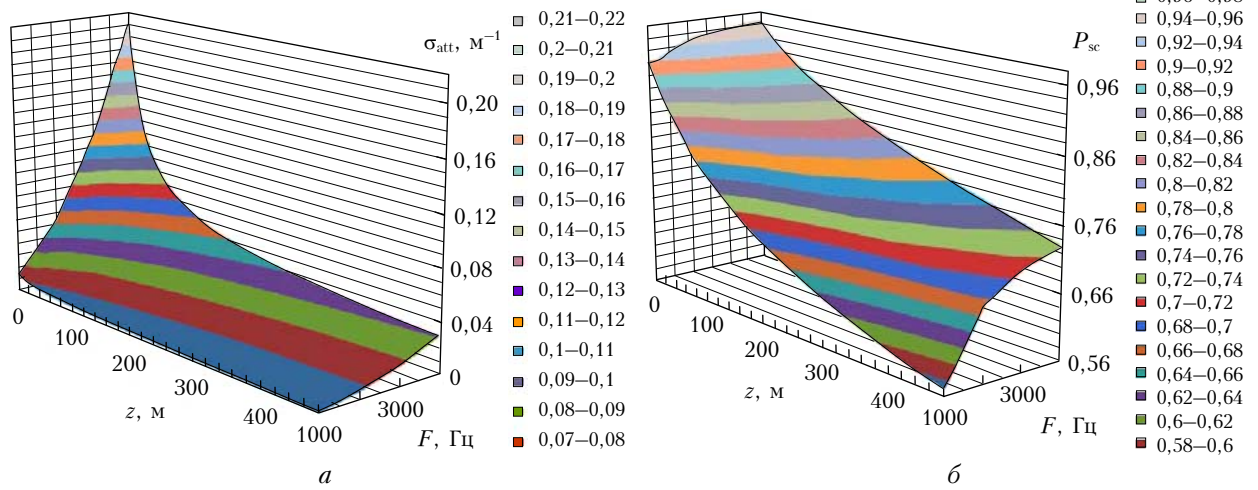


Рис. 1. Высотная зависимость коэффициентов суммарного ослабления звука (а) и вероятностей выживания фононов (б) для частот $F = 1000 \div 4000$ Гц и внешнего масштаба турбулентности $L_0 = 80$ м

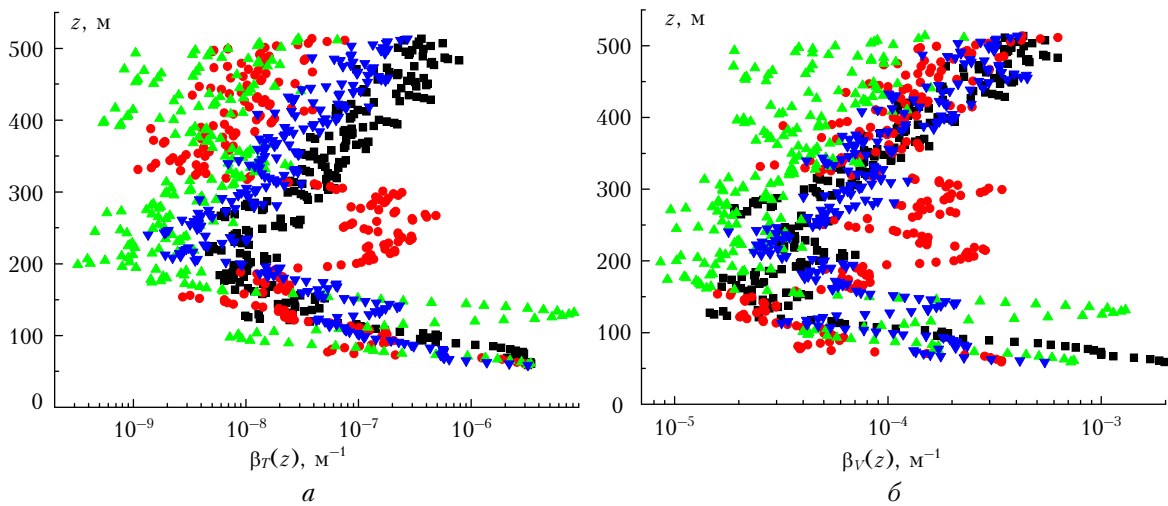


Рис. 2. Типичные синхронные высотные профили коэффициентов ослабления звука на флуктуациях скорости ветра (а) и температуры (б) для звуковой частоты 1700 Гц, измеренные содаром «Звук-2» [18]

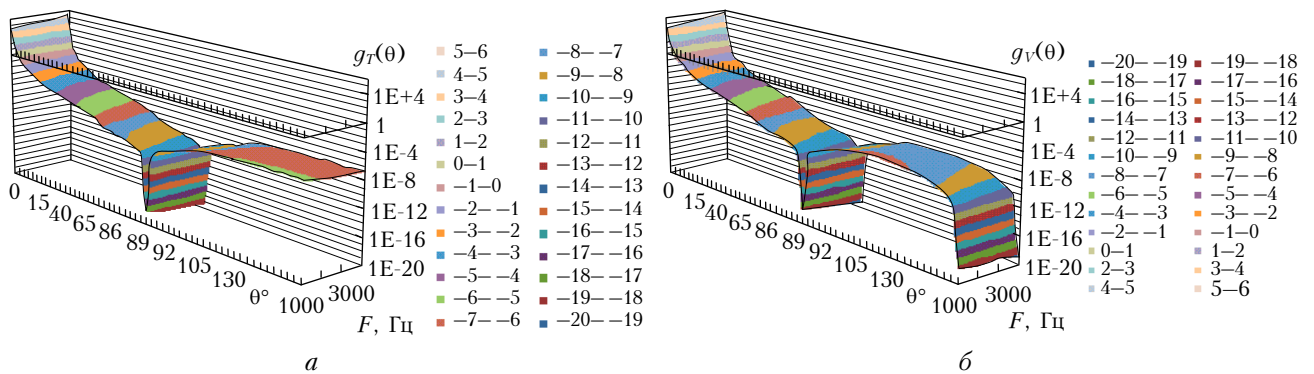


Рис. 3. Нормированные индикатрисы рассеяния звука на флуктуациях температуры (а) и скорости ветра (б) для частот $F = 1000 \div 4000$ Гц и внешнего масштаба турбулентности $L_0 = 80$ м

Блок-схема вычислительного алгоритма представлена в [10].

Расчеты проводились для точечного источника с координатами $x = 0, y = 0, z = H_s$, где $0 \leq H_s \leq 35$ м, и излучателя с круговой апертурой диаметром 1 м мощностью 1 Вт для звуковых частот $1000 \leq F \leq 4000$ Гц и значений внешнего масштаба атмосферной турбулентности $L_0 = 10 \div 100$ м. Угол расходимости излучения источника $\phi = 2,5 \div 25^\circ$. Приемник излучения располагался на высоте 500 м. Оценивалось распределение излучения по горизонтальной плоскости детектора в зависимости от расстояния H по вертикальной оси расположения источника (по зонам детектора с $H = 10 \div 100$ м с шагом 10 м и с шагом 50 м до $H = 500$ м) с учетом вклада многократно рассеянного излучения. Излучение источника распространялось через плоскопараллельные слои атмосферы с постоянными в пределах этих слоев коэффициентами классического $\sigma_{cl}(j)$ и молекулярного $\sigma_{mol}(j)$ поглощения и рассеяния на турбулентных флуктуациях температуры $\sigma_T(j)$ и скорости ветра $\sigma_V(j)$, $j = 1, \dots, 25$. Была рассмотрена 500-метровая плоскостратифицированная модель турбулентной атмосферы, разделенная на 25 слоев по 20 м каждый. Расчеты проводились на персональном компьютере для $10^6 - 10^7$ фоновых историй, что обеспечивало погрешность в диапазоне 3–10%. Время расчета отдельной реализации не превышало 15 мин.

В качестве примера на рис. 1 (см. вклейки) из [17] приведены высотные профили суммарного коэффициента ослабления звука $\sigma_{att}(j) = \sigma_{cl}(j) + \sigma_{mol}(j) + \sigma_T(j) + \sigma_V(j)$ для частот 1000–4000 Гц и внешнего масштаба турбулентности $L_0 = 80$ м и вероятности рассеяния фона $P_{sc}(j) = [\sigma_T(j) + \sigma_V(j)] / \sigma_{att}(j)$.

Результаты расчетов показали, что для частоты 2 кГц, наиболее часто используемой в содарах, турбулентное ослабление становится сравнимым с молекулярным поглощением в приземном слое атмосферы уже для $L_0 = 15$ м ($P_{sc} \geq 0,5$). Для $L_0 = 80$ м $P_{sc} > 0,56$ в рассматриваемом диапазоне частот (см. рис. 1, б). В приземном слое суммарный коэффициент ослабления увеличивается примерно на порядок с ростом L_0 от 10 до 80 м.

На рис. 2 (см. вклейки) приведены типичные экспериментальные высотные профили коэффициентов ослабления звука на флуктуациях скорости ветра (β_V) и температуры (β_T) для звуковой частоты 1700 Гц по результатам измерений содаром «Звук-2» [18].

Результаты индивидуальных серий измерений, усредненные за 10-мин период, выделены цветом и символами. Видно, что турбулентное ослабление прошедшего акустического излучения в основном определяется турбулентными флуктуациями скорости ветра. В дневных конвективных условиях вклад турбулентного ослабления звука на флуктуациях температуры на 1–3 порядка меньше, чем на флуктуациях скорости ветра.

На рис. 3 (см. вклейки) показаны нормированные теоретические индикатрисы рассеяния звука на

флуктуациях температуры и скорости ветра для $L_0 = 80$ м [17]. Результаты наших расчетов показали, что вытянутость индикатрисы в направлении вперед растет с увеличением внешнего масштаба турбулентности. Так, доля излучения, рассеянного в направлении вперед, возрастает в 15 раз с ростом L_0 с 10 до 40 м; она увеличивается в 63 раза при $L_0 = 80$ м.

На рис. 4 из [12] показаны результаты сравнения теоретических и экспериментальных индикатрис рассеяния.

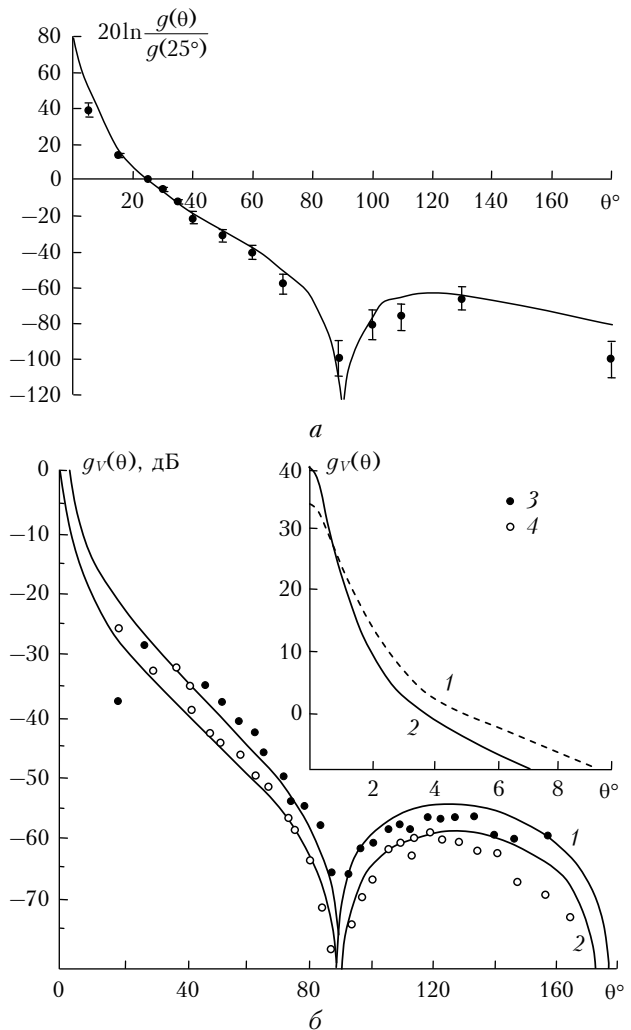


Рис. 4. Сравнение теоретических и экспериментальных индикатрис рассеяния: а – расчетной (сплошная кривая) и экспериментально измеренной в [19] полной индикатрисы рассеяния звука для частоты 11 кГц; б – 1, 2 – расчет, $L_0 = 1$ м; 3, 4 – эксперимент [20]; частота излучения: 1, 3 – 33,2; 2, 4 – 64,4 кГц. Отдельно показаны теоретические индикатрисы рассеяния в области малых углов $0^\circ \leq \theta \leq 10^\circ$

На рис. 4, а полная индикатриса рассеяния на флуктуациях температуры и скорости ветра сравнивается с измеренной в [19] для звуковой частоты 11 кГц. На рис. 4, б представлены результаты сравнения теоретических индикатрис рассеяния звука на флуктуациях скорости ветра с результатами модельного эксперимента [20] для частот 33,2 и 64,4 кГц.

Результаты сравнения свидетельствуют о хорошем согласии с экспериментальными данными.

Источник звука акустической мощностью 1 Вт помещался на высоту $0 \leq H_s \leq 35$ м над земной поверхностью. Гипотетический приемник был помещен над источником на высоте 500 м от земли. Оценивались распределение прошедшего излучения по горизонтальной плоскости детектора и вклад многократно рассеянного излучения.

Координаты точки рождения фонана (x_0, y_0, z_0) и его направляющие косинусы ($\omega_1, \omega_2, \omega_3$) вычислялись с использованием процедуры, описанной в [14]. Поверхность Земли считалась абсолютно поглощающей, и когда траектория фонана пересекала плоскость $z = 0$, фонон считался поглощенным и рассматривалась новая фононная история.

Длина свободного пробега фонана моделировалась по следующей схеме.

а) Пусть c – косинус угла между положительным направлением оси z и направлением вылета фонана, тогда $\Delta l = dz/c$ – путь, пройденный фононом через слои атмосферы с коэффициентами ослабления $\sigma_{\text{att}}[1], \dots, \sigma_{\text{att}}[N]$.

б) Последовательным вычитанием находим номер j -го слоя, для которого выполняется неравенство

$$\begin{aligned} \frac{z[1] - z_0}{c} + \Delta l \sum_{m=2}^{j-1} \sigma_{\text{att}}[m] < -\ln(\text{rand}) \leq \\ \leq \frac{z[1] - z_0}{c} + \Delta l \sum_{m=2}^j \sigma_{\text{att}}[m], \end{aligned}$$

где rand – случайное число, равномерно распределенное в интервале $[0, 1]$.

в) Если не существует номера j , удовлетворяющего данному условию, считается, что фонон вылетел из среды, иначе

$$l_{\text{tr}} = \frac{z_0 - z[1]}{c} + (j-1)\Delta l - \frac{\ln(\text{rand}) + \Delta l \sum_{m=1}^{j-1} \sigma_{\text{att}}[m]}{\sigma_{\text{att}}[j]}.$$

Точка следующего столкновения выбиралась по известным формулам [14].

Затем разыгрывался тип столкновения. Для этого использовалась следующая процедура:

- а) $p_1 = \sigma_{\text{cl}}(j), p_2 = \sigma_{\text{mol}}(j), p_3 = \sigma_T(j), p_4 = \sigma_V(j)$;
- б) $P_1 = p_1, P_2 = p_1 + p_2, P_3 = p_1 + p_2 + p_3, P_4 = p_1 + p_2 + p_3 + p_4$;
- в) $F_1 = P_1/P_4, F_2 = P_2/P_4, F_3 = P_3/P_4, F_4 = P_4/P_4 = 1$;
- г) $\alpha = \text{rand}$;
- д) $k = 1$;
- е) если $\alpha < F_k$, переходим на «ж»; иначе $k = k + 1$ и переходим на «е»;
- ж) если $k = 1$, моделировалось молекулярное поглощение; если $k = 2$ – классическое; если $k = 3$ – рассеяние на флуктуациях скорости ветра; иначе, рассеяние на флуктуациях температуры.

В случае поглощения фонон уничтожался и его статистический вес суммировался в элемент массива,

определяющий интенсивность акустической волны, поглощенной в j -м слое атмосферы. В случае рассеяния угол рассеяния выбирался в соответствии с индикатрисой рассеяния на флуктуациях температуры или скорости ветра в зависимости от типа столкновения. Процедура моделирования угла рассеяния описана в [15].

Рассчитывалось распределение интенсивности прошедшего излучения I_{tr} по горизонтальной плоскости детектора. Оценивались также вклады нерассеянного, однократно и многократно рассеянного излучения ($I_{\text{nsc}}, I_{\text{ssc}}$ и I_{msc} соответственно).

Результаты расчетов методом Монте-Карло суммарной величины ослабления акустического излучения (в дБ) при его распространении вдоль вертикальной трассы для частот 2800 Гц (штриховая кривая) и 4000 Гц (сплошная) показаны на рис. 5 из [17].

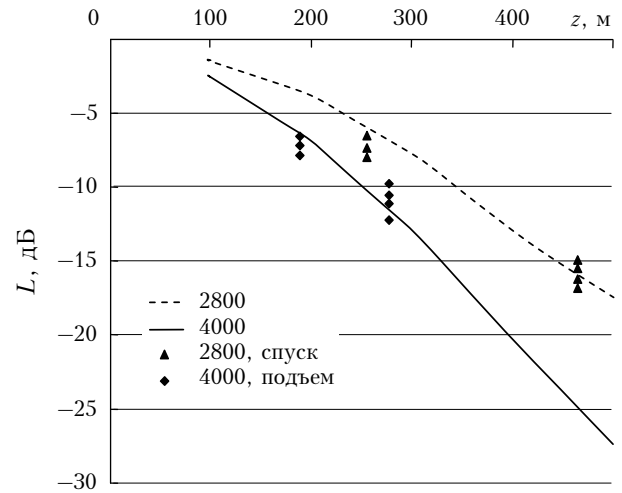


Рис. 5. Суммарное ослабление L звука при его вертикальном распространении. Штриховая кривая – расчет по методу Монте-Карло, треугольники – измерения [14] при подъеме привязного аэростата для $F = 2800$ Гц; сплошная кривая – расчет, ромбы – измерения [14] при спуске привязного аэростата для $F = 4000$ Гц

Символами здесь представлены результаты измерений [21] с привязным аэростатом. Видно хорошее согласие результатов наших расчетов по методу Монте-Карло с экспериментальными данными, что подтверждает эффективность предложенного вычислительного алгоритма.

Влияние размеров апертуры источника и распределения излучения по ней иллюстрируется рис. 6 из [17], на котором приведены распределения интенсивности прошедшего (I_{tr}) и многократно рассеянного (I_{msc}) излучения (в Вт/м²) по зонам детектора для точечного источника звука и излучателя с круговой апертурой диаметром 1 м при равномерном и гауссовом распределении излучения по апертуре для $F = 3000$ Гц, $\phi = 2,5^\circ$ и $L_0 = 10$ м.

Видно, что интенсивность прошедшего излучения в первой зоне детектора $I_{\text{tr}}(0^\circ, 2,5^\circ)$ возрастает на 66–68% для источника с круговой апертурой и гауссовым распределением по сравнению с точечным источником. При этом для источника с круговой апер-

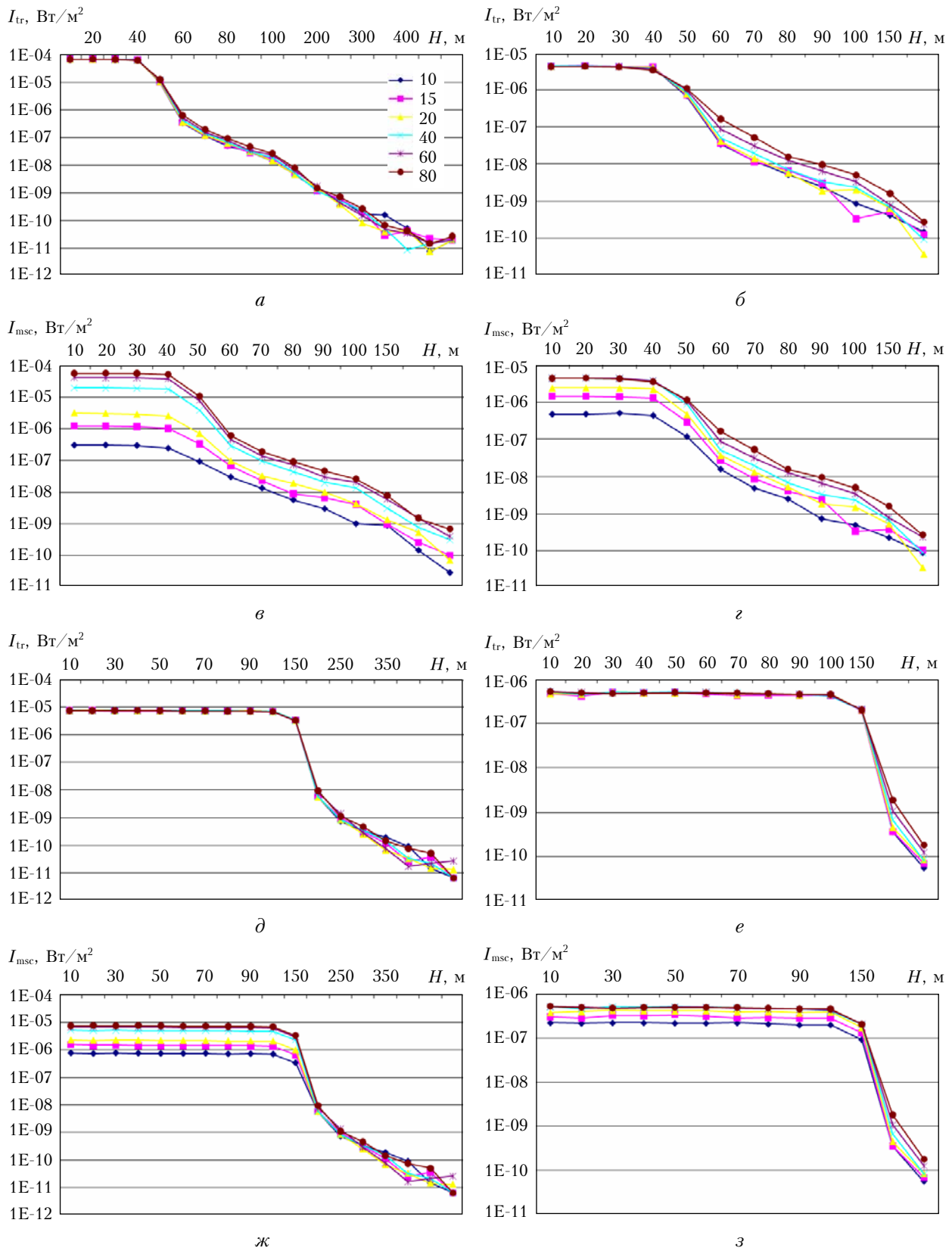


Рис. 7. Распределение интенсивности прошедшего (I_{tr} , $\text{Вт}/\text{м}^2$) и многократно рассеянного излучения (I_{msc} , $\text{Вт}/\text{м}^2$) по зонам детектора для $F = 1,7$ кГц, $\phi = 5^\circ$ (*a*, *в*) и 15° (*д*, *ж*); $F = 4$ кГц, $\phi = 5^\circ$ (*б*, *г*) и 15° (*е*, *з*) и значений внешнего масштаба турбулентности (в метрах), указанного справа на рис. 7, *a*

турой и равномерным распределением она остается практически неизменной.

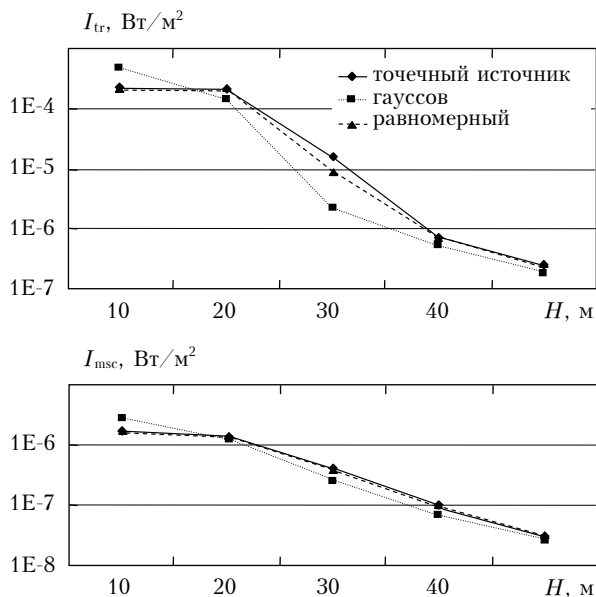


Рис. 6. Распределения интенсивности прошедшего (I_{tr}) и многократно рассеянного (I_{msc}) акустического излучения по зонам детектора для точечного источника и излучателя с круговой апертурой при равномерном и гауссовом распределении излучения

На рис. 7 (см. вклейки) из [10] представлена расчетная зависимость распределения интенсивности прошедшего и многократно рассеянного излучения по зонам детектора для звуковых частот 1,7 и 4 кГц и углов расходимости источника $\phi = 5$ и 15° . Результаты расчетов показали, что для $F = 1,7$ кГц вклад многократного рассеяния в интенсивность прошедшего излучения возрастает с увеличением внешнего масштаба с $\sim 10\%$ для $L_0 = 10$ м до $\sim 90\%$ для $L_0 = 60$ м; для $L_0 = 80$ м интенсивность прошедшего излучения практически полностью определяется вкладом многократного рассеяния. При этом резкий спад I_{tr} обусловлен выходом за пределы конуса излучения источника. Вклад многократного рассеяния в пределах конуса излучения источника увеличивается с $4,7 \cdot 10^{-7}$ до $4,3 \cdot 10^{-6}$ Вт/м², т.е. на 89% при росте L_0 с 10 до 80 м. Это увеличение вклада многократного рассеяния компенсирует соответствующее уменьшение интенсивности прошедшего излучения за счет роста внешнего масштаба турбулентности и, как видно из рис. 7, а, I_{tr} для $H \leq 50$ м практически не зависит от L_0 .

Зависимость интенсивности прошедшего излучения для первой зоны детектора от угла расходимости источника приведена на рис. 8 из [9]. Она хорошо описывается квадратичной степенной зависимостью [9]: $I_{tr}(\phi) = A \cdot \phi^{-2}$. При этом для $F = 1000, 2000, 3000$ и 4000 Гц $A = 2,8 \cdot 10^{-3}, 1,4 \cdot 10^{-3}, 2 \cdot 10^{-5}, 4 \cdot 10^{-6}$. С увеличением угла расходимости источника с 5 до 25° I_{tr} уменьшается на 96%, что подтверждает необходимость использования защитных бленд для содаров.

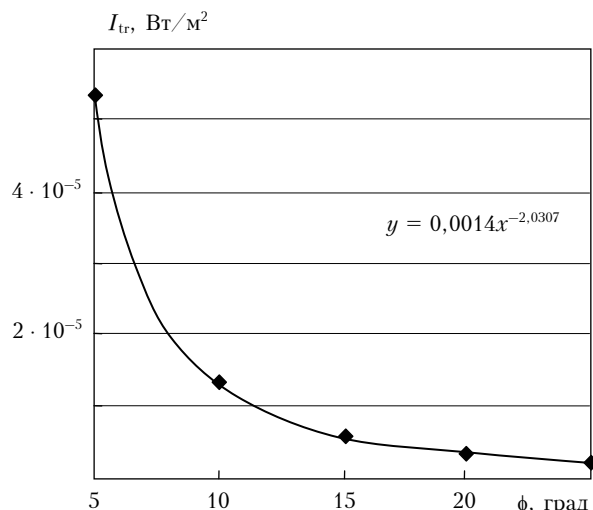


Рис. 8. Расчетная зависимость интенсивности прошедшего излучения от угла расходимости источника и ее аналитическая аппроксимация степенной зависимостью (сплошная кривая) для $F = 2$ кГц и $L_0 = 10$ м

На рис. 9 (см. вклейки) из [5] представлены расчетные зависимости вклада многократного рассеяния I_{msc} в интенсивность прошедшего излучения для первой зоны детектора с радиусом $H = 10$ м от высоты расположения источника H_s для $L_0 = 10$ (а) и 20 м (б). По оси y отложены звуковые частоты F .

Видно, что вклад многократного рассеяния существенно уменьшается с ростом высоты источника от 5 до 20 м. При дальнейшем увеличении высоты он меняется слабо. Следовательно, высота источника $H_s = 20$ м может быть рекомендована как оптимальная для акустического зондирования с учетом того, что сигнал многократного рассеяния является помехой при интерпретации данных акустического зондирования.

Влияние облачности иллюстрируется рис. 10 (см. вклейки) из [8], на котором приведены статистические оценки вклада многократного рассеяния MRS в интенсивность прошедшего излучения в диапазоне частот 500–3000 Гц в ясные и пасмурные зимние дни (для средних за зиму значений относительной влажности у земной поверхности 67 и 81% соответственно [22]).

Видно, что для $L_0 = 20$ м и звуковой частоты 3000 Гц вариации вклада многократного рассеяния, обусловленные облачностью, составляют $\sim 20\%$, причем в пасмурные дни вклад многократного рассеяния увеличивается.

Для исследования сезонных вариаций вклада многократного рассеяния расчеты проводились для летней [3] и зимней [22, 23] стандартных среднеширотных моделей атмосферы. Результаты расчетов представлены на рис. 11 из [8].

Видно, что для $F = 3500$ Гц и $L_0 = 5$ м летом вклад многократного рассеяния на 20–25% больше, чем зимой. Кроме того, его сезонная зависимость имеет сложный характер. Вклад многократного рассеяния может быть больше как зимой, так и летом, в зависимости от частоты акустического излучения

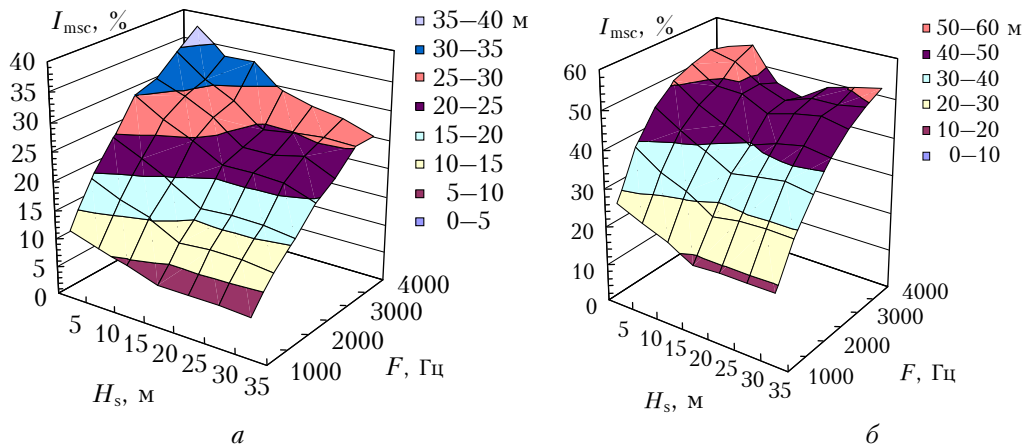


Рис. 9. Зависимость величины вклада многократного рассеяния в интенсивность прошедшего излучения от высоты H_s расположения источника над поверхностью Земли для $L_0 = 10$ (а) и 20 м (б)

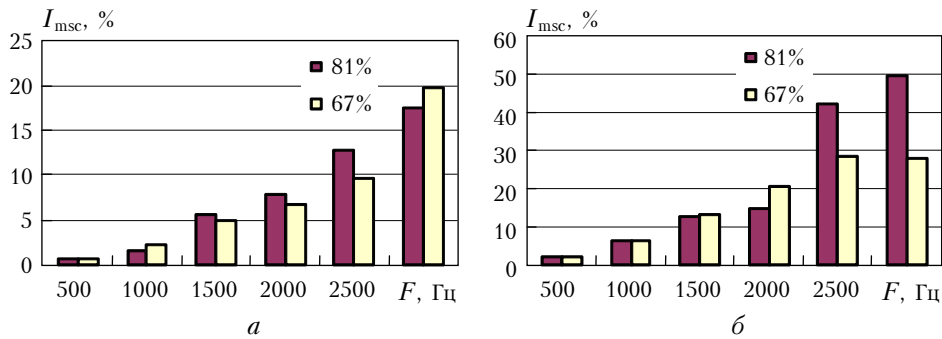


Рис. 10. Вклад многократного рассеяния для первой зоны детектора в интенсивность прошедшего акустического излучения в ясные и пасмурные дни для $H_s = 35$ м и $L_0 = 10$ (а) и 20 м (б)

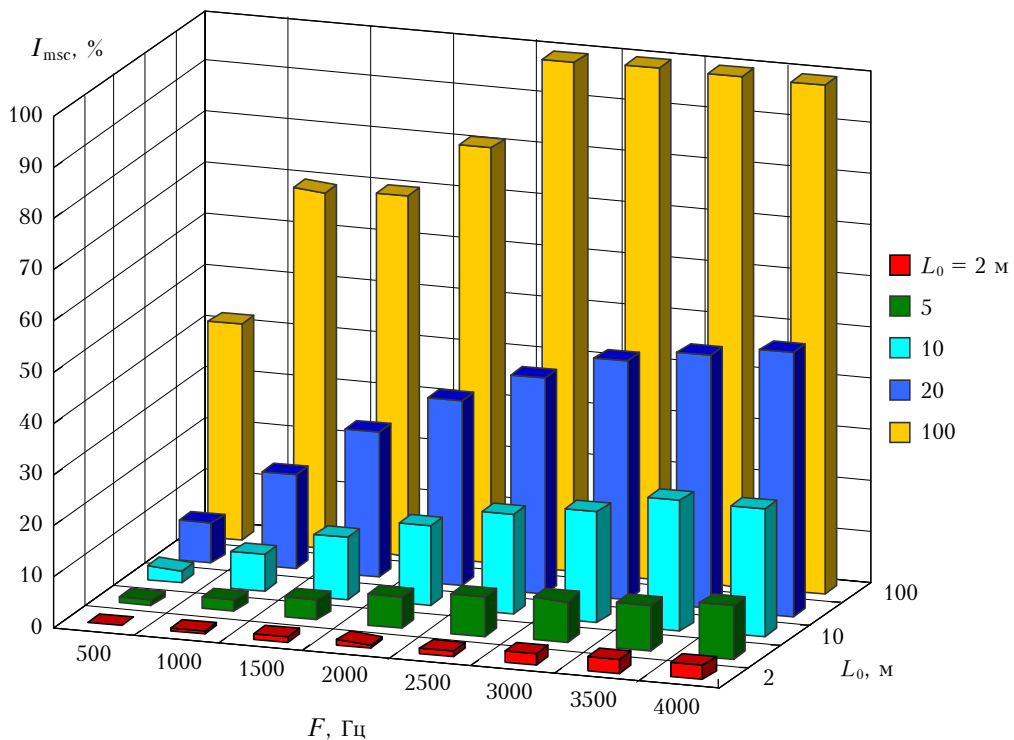


Рис. 12. Статистические оценки вклада многократного рассеяния в интенсивность прошедшего звукового излучения для первой зоны детектора

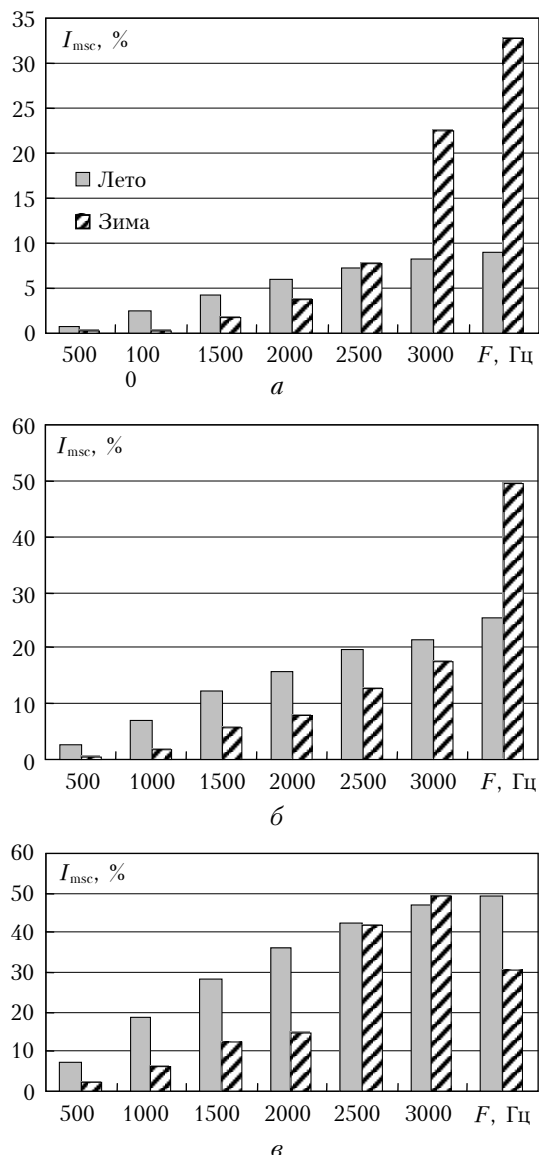


Рис. 11. Сезонная (зима–лето) изменчивость вклада многократного рассеяния в интенсивность прошедшего излучения для первой зоны детектора, $H_s = 35$ м и $L_0 = 20$ м

и внешнего масштаба атмосферной турбулентности. Частотная зависимость сезонной изменчивости немонотонная. При $F = 1500 \div 3000$ Гц и $L_0 = 10$ м вклад многократного рассеяния больше летом, чем зимой, в то время как при $F = 3500$ Гц он больше зимой, чем летом. Для $L_0 = 20$ м вклад многократного рассеяния больше летом, чем зимой, за исключением $F = 2500$ и 3000 Гц, при которых он примерно одинаков.

Статистические оценки региональной изменчивости вклада многократного рассеяния оценивались для условий Москвы и Новосибирска. Найдено, что в условиях зимы при $L_0 = 20$ м и $F = 3000$ Гц вклад многократного рассеянного излучения для первой зоны детектора составил 34% для Москвы и 50% для Новосибирска, что свидетельствует о его существенной региональной изменчивости.

Влияние внешнего масштаба атмосферной турбулентности исследовалось нами в [5, 9]. На рис. 12 (см. вклейки) из [5] приведены статистические оценки вклада многократного рассеяния. По оси x указаны звуковые частоты, а по оси y значения внешнего масштаба атмосферной турбулентности.

Видно, что для $L_0 = 2$ м вклад многократного рассеяния незначителен. Для $L_0 = 5$ м и $F \leq 2500$ Гц он не превышает 10% и достигает $\sim 15\%$ для $F = 4000$ Гц. Для $L_0 = 20$ м он равен 60% и достигает 100% для $L_0 = 100$ м и $F \geq 2500$ Гц. Эти оценки полезны для количественной интерпретации данных акустического зондирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственной НИР (рег. № 01201050572) и НИР в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (ГК № 02.740.11.0232; 14.740.11.0204).

1. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя. Томск: Водолей, 2001. 278 с.
2. Голицын Г.С., Романова Н.Н. Вертикальное распространение звуковых волн в атмосфере с переменной по высоте вязкостью // Изв. АН СССР. 1968. Т. 4, № 2. С. 118–120.
3. Matuschek R., Mellert V., Kephelopoulous S. Model calculations with a fast field programme and comparison with selected procedures to calculate road traffic noise propagation under definite meteorological conditions // Acta Acustica United with Acustica. 2009. V. 95, N 5. P. 941–949.
4. Байкалова Р.А., Креков Г.М., Шаманаева Л.Г. Статистические оценки вклада многократного рассеяния при распространении звука в атмосфере // Оптика атмосф. и океана. 1988. Т. 1, № 5. С. 25–30.
5. Шаманаева Л.Г., Буркатовская Ю.Б. Статистические оценки вклада многократного рассеяния в интенсивность акустического излучения, прошедшего нижний 500-м слой атмосферы // Изв. вузов. Физ. 2004. № 12. С. 71–76.
6. Shamaeva L.G., Burkatovskaya Yu.B. Study of multiple scattering effects on the acoustic wave propagation through a turbulent atmosphere // Proc. 12th Int. Sympos. on Acoustic Remote Sensing and Associated Techniques of the Atmosphere and Oceans / P. Anderson, S. Bradley, S. von Hunerbein, eds. UK. Cambridge, 2004. P. 145–148.
7. Shamaeva L., Burkatovskaya Yu. Statistical estimates of the multiple scattering contribution to the transmitted acoustic radiation intensity // Int. Sympos. for the Advancement of Boundary Layer Remote Sensing: Extended Abstracts / S. Emeis, ed. Germany, Garmisch-Partenkirchen, 2006. P. 14–16.
8. Шаманаева Л.Г., Буркатовская Ю.Б. Вариации вклада многократного рассеяния в интенсивность прошедшего акустического излучения // Изв. вузов. Физ. 2007. № 10. С. 86–90.
9. Белов В.В., Буркатовская Ю.Б., Красненко Н.П., Шаманаева Л.Г. Статистические оценки влияния угла расходимости источника на характеристики прошедшего акустического излучения // Изв. вузов. Физ. 2009. № 12. С. 14–19.
10. Белов В.В., Буркатовская Ю.Б., Красненко Н.П., Шаманаева Л.Г. Влияние ширины диаграммы направленности источника на характеристики прошедшего акустического излучения // Материалы XVI Междунар. симпоз. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск, 2009. С. 142–146.

11. *Belov V.V., Burkatovskaya Yu.B., Krasnenko N.P., Shamanaeva L.G.* Statistical estimates of influence of the angular beam divergence on the characteristics of acoustic radiation transmitted through the atmosphere // 15th Int. Sympos. for the Advancement of Boundary Layer Remote Sensing. France, Paris, 2010. URL: <http://www.isars2010.uvsq.fr>. P. P-RET/01-1–P-RET/01-4.
12. *Baikalova R.A., Krekov G.M., Shamanaeva L.G.* Theoretical estimates of sound scattering by atmospheric turbulence // J. Acoust. Soc. Amer. 1988. V. 83, N 4. P. 1332–1335.
13. *Глаголев Ю.А.* Справочник по физическим параметрам атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. С. 68–70.
14. *Марчук Г.И., Михайлов Г.А., Назаралиев М.А., Дарбинян Р.А., Каргин Б.А., Еленов Б.С.* Метод Монте-Карло в атмосферной оптике. Новосибирск: Наука, 1976. 280 с.
15. *Креков Г.М., Шаманаева Л.Г.* Статистические оценки спектральной яркости сумеречной земной атмосферы // Атмосферная оптика. М.: Наука, 1974. С. 180–186.
16. *Креков Г.М., Сьедин В.Я., Шаманаева Л.Г.* Применение метода Монте-Карло к задачам переноса акустического излучения в атмосфере // VIII Всесоюз. симпоз. по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Томск, 1984. С. 176–181.
17. *Белов В.В., Буркатовская Ю.Б., Красненко Н.П., Шаманаева Л.Г.* Метод Монте-Карло в атмосферной акустике // XVII Междунар. симпоз. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск, 2011. С. P-15–P-19.
18. *Shamanaeva L.G.* Excess turbulent extinction of sound waves propagating along horizontal and vertical atmospheric paths // Proc. 11th Int. Sympos. on Acoustic Remote Sensing and Associated Techniques of the Atmosphere and Oceans / S. Argentini, G. Mastrantonio, I. Petenko, eds. Italy, Rome, 2002. P. 47–50.
19. *Калустратова М.А.* Экспериментальные исследования рассеяния звука в атмосфере // Труды Института физики атмосферы. М.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 203–256.
20. *Baerg B., Schwarz W.H.* Measurements of the scattering of sound by 7 turbulence // J. Acoust. Soc. Amer. 1966. V. 39. P. 1125–1132.
21. *Aubry M., Baudin F., Weil A., Rainteau P.* Measurements of the total attenuation of acoustic waves in the turbulent atmosphere // J. Geophys. Res. 1974. V. 79, N 36. P. 5598–5606.
22. *Матвеев Л.Т.* Курс общей метеорологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 151 с.
23. *Комаров В.С., Креминский А.В., Синева К.Я.* Компьютерная информационная база региональных климатических моделей температуры и ветра для пограничного слоя атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 1996. Т. 9, № 4. С. 484–488.

V.V. Belov, Yu.B. Burkatovskaya, N.P. Krasnenko, L.G. Shamanaeva. **Monte Carlo method in atmospheric acoustics.**

The article presents a review of authors' works devoted to the application of the Monte Carlo method to a solution of the problem of acoustic radiation propagation through the lower 500-meter layer of the plane-stratified turbulent atmosphere. The acoustic model of the atmosphere is considered and the structure and special features of the Monte Carlo algorithm are discussed. The influence of the outer scale of atmospheric turbulence on the transmitted acoustic radiation intensity at frequencies of 1–4 kHz, regional and seasonal variations of the multiple scattering contribution to the transmitted radiation intensity, as well as the influence of cloudiness and source altitude are investigated. Calculated dependences of the transmitted acoustic radiation intensity and multiple scattering contributions on the acoustic radiation frequency, source divergence angle and altitude above the underlying surface, season of the year, and vertical profiles of the atmospheric meteorological parameters are discussed. Good agreement of the calculated total sound attenuation with the available experimental data confirms the reliability of the results of statistical simulation.