

**Н.Г. Абрамов, А.Я. Богушевич, В.И. Карпов,
Н.П. Красненко, А.А. Фомичев**

ВОЗМОЖНОСТИ ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗА ПРИЗЕМНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ШУМОВ В АТМОСФЕРЕ С УЧЕТОМ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Описывается программный комплекс <Акустика открытых пространств>, предназначенный для оперативного оценивания среднего поля звуковых давлений в приземном слое атмосферы, создаваемого источником шума при его удалении на несколько километров. Учитываются характеристики источника шума, высотные профили основных метеорологических параметров атмосферы, параметры подстилающей поверхности и характеристики атмосферной турбулентности. Приводятся результаты натурных испытаний комплекса для дальностей от источника звука до 6 км.

Известно, что шумовое загрязнение атмосферы одним и тем же источником может быть различным в зависимости от существующих метеорологических условий. Причина этих различий заключается в высокой чувствительности звуковых волн в атмосфере к таким метеорологическим параметрам, как скорость ветра, температура и влажность воздуха, атмосферное давление. Существенное влияние на приземное распространение звука также оказывают турбулентные флуктуации этих характеристик и параметры подстилающей поверхности.

Средние значения указанных метеорологических параметров сказываются непосредственно как на абсолютном значении суммарного коэффициента поглощения звука на фиксированной частоте, так и на его частотной зависимости. Поглощение звука происходит таким образом, что на большие расстояния в атмосфере могут распространяться только низкочастотные гармоники шума. Другим важным фактором при приземном распространении шума является влияние рефракции. Это влияние возникает вследствие изменения с высотой средних значений метеорологических параметров, прежде всего скорости ветра и температуры. Рефракция приводит к одному из двух противоположных случаев [1,2]. В первом случае шум распространяется по лучевым траекториям, загибающимся вниз, например, при попутном ветре или при наличии температурной инверсии в атмосфере. В результате наблюдается волновое распространение шума с многократным переотражением его от земли на большие расстояния от источника. В другом случае его лучевые траектории загибаются вверх. Это может происходить при встречном ветре или при убывании температуры с высотой. В приземном слое атмосферы в этом случае появляется, начиная с некоторого горизонтального расстояния, зона акустической тени. В ней имеет место только слабый по интенсивности шум, возникающий при рассеянии звука турбулентными неоднородностями атмосферы. Изложенное показывает, насколько важно учитывать информацию о метеорологических параметрах при оценке возможного шумового загрязнения атмосферы. При этом такая оценка должна осуществляться за промежуток времени, не превышающий интервал стационарности метеорологических полей.

В данной статье дается общее описание разработанного нами программного комплекса <Акустика открытых пространств>, предназначенного для быстрой оценки звуковых давлений шума в слышимом диапазоне частот на дальностях до 10 км. Также приводятся результаты экспериментов в натуральных условиях, показывающие его эффективность.

Программный комплекс предлагается использовать в системе оперативного прогноза шумового загрязнения в приземной атмосфере, включающей в качестве технических средств компьютер IBM PC/AT и устройство для измерения метеорологических параметров. На рис. 1 приведена укрупненная структурная схема алгоритма этого комплекса.

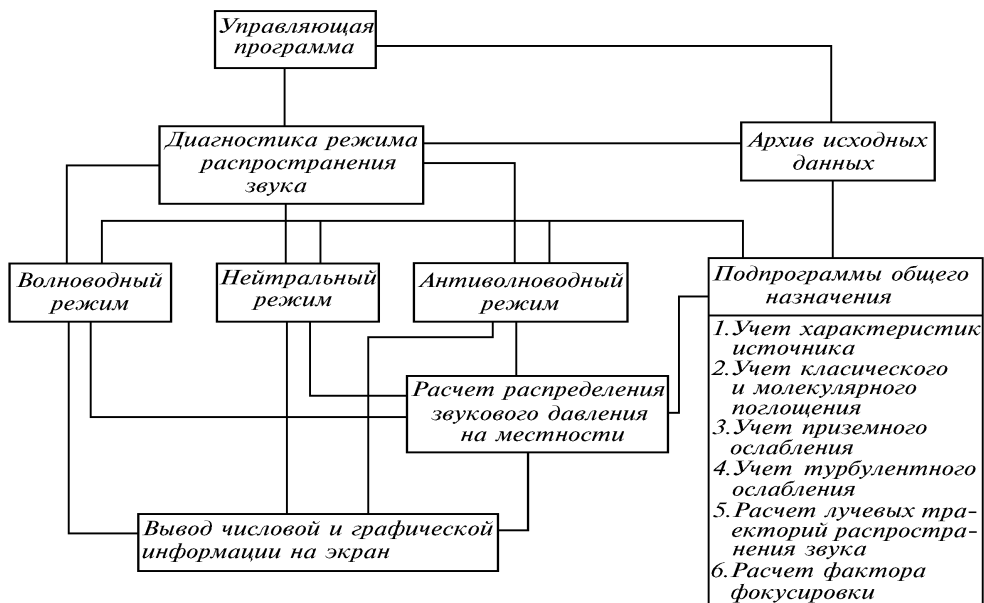


Рис. 1. Структурная схема программного комплекса <Акустика открытых пространств>

Исходными данными для решения задач прогноза здесь служат четыре группы входных параметров: метеорологических, подстилающей поверхности, источника шума и трассы его распространения. Из метеорологических параметров в комплексе учитываются скорость v и направление φ горизонтального ветра, температура T и относительная влажность U воздуха, атмосферное давление p_a , структурные постоянные турбулентных флуктуаций температуры C_T^2 и скорости ветра C_v^2 . Диагностика режима распространения звука основана здесь на анализе высотного распределения знака градиента фазовой скорости звука. Кроме указанных ранее, в комплексе может рассматриваться режим, названный нейтральным. К этому режиму относится случай, когда в точку наблюдения приходят только два луча: прямой и отраженный от земли, причем прямой луч не имеет точки поворота. Лучевые картины распространения звука при всех трех режимах, предусмотренных в комплексе, схематично показаны на рис. 2.

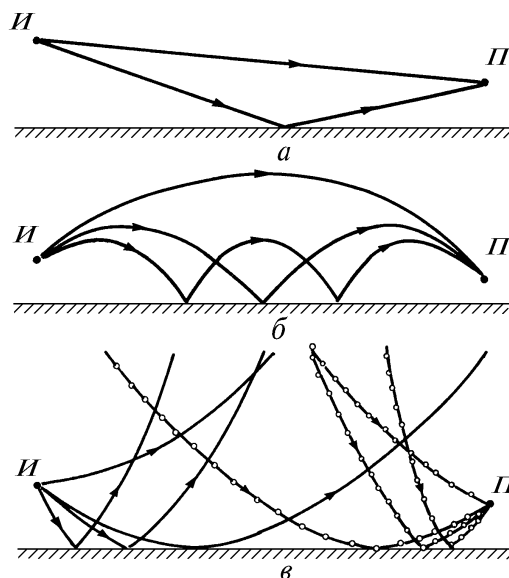


Рис. 2. Лучевые картины распространения акустического шума в атмосфере при различных метеорологических условиях: a – нейтральный режим; b – волноводный режим (приведены только лучи типа <верх–низ>); v – антиволноводный режим. $И$ – источник шума, $П$ – пункт наблюдения, ----- - лучи прямого попадания, $\circ-\circ-\circ-\circ$ – рассеянные лучи

Лучевая картина распространения звука в случае нейтрального режима характеризуется пренебрежимо малой кривизной лучевых траекторий и может наблюдаться только при очень малых значениях градиентов скорости ветра и температуры. Поэтому расчеты в случае нейтрального режима проводятся без учета влияния рефракции по алгоритму

$$L_{\Pi}(f) = L_{\Pi}(f) + L_{\kappa, \text{м}}(f) + L_{\text{т}}(f) + L_{\text{з}}(f) + L_{\text{р}}(f) + L_{\text{д.н}}(f), \quad (1)$$

где $L_{\Pi}(f)$ – уровень шума в заданном пункте на частоте f , дБ; L_{Π} – звуковое давление излучаемого шума, пересчитанное к расстоянию в 1 м от источника; $L_{\kappa, \text{м}}$ – вклад классического и молекулярного поглощения звука в воздухе; $L_{\text{т}}$ – вклад турбулентного ослабления звука; $L_{\text{з}}$ – вклад приземного ослабления звука (учитывает влияние интерференции прямой и отраженной волн); $L_{\text{р}}$ – вклад угловой расходимости волны (при данном режиме сферической); $L_{\text{д.н}} = 10 \lg [F_{\text{д.н}}(\alpha, \varphi, f)]$ – слагаемое, учитывающее влияние нормированной функции направленности источника $F_{\text{д.н}}(\alpha, \varphi, f)$.

Все слагаемые в правой части (1), кроме L_{Π} , имеют, как правило, отрицательное значение. Соотношение (1) выражает закон сохранения энергии волны и по своей структуре является уравнением энергетического баланса. Алгоритмы расчета отдельных компонент ослабления звука подробно описаны в литературе (см., например, [3]). Отметим, что при распространении звука на большие дальности d , превышающие 1 км, нейтральный режим практически никогда не наблюдается.

При анализе волноводного распространения шума рассчитываются лучи, которые попадают в заданный пункт при существующих профилях скорости ветра $\mathbf{v}(z)$ и скорости звука в воздухе $c(z)$. Данный анализ проводится на основе уравнения, описывающего горизонтальные координаты $\mathbf{r} = \mathbf{r}(x, y)$ любой точки луча, характеризуемого углами его выхода α и φ , определяемыми в двух ортогональных плоскостях. В предположении, что среднее значение вертикальной компоненты скорости ветра v_z равно 0, уравнение луча имеет вид [2]

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \int_{z_<}^{z_>} \frac{\mathbf{K} \frac{\mathbf{v}}{c} + \mathbf{a}}{q} dz, \quad (2)$$

где \mathbf{r}_0 – горизонтальные координаты начальной точки луча; $z_<$ и $z_>$ – высоты нижней и верхней точек луча; $K(z) = [\omega - \mathbf{a} \cdot \mathbf{v}(z)]/c(z)$ – волновое число в движущейся среде; $q(z) = \sqrt{K^2(z) - \mathbf{a}^2}$ – его вертикальная компонента; $c(z) \approx 20,067\sqrt{T(z)}$, T – абсолютная температура воздуха, \mathbf{K} ; $|\mathbf{a}| = k_0 \cos \alpha \{1 + v_0/c_0 \cos \alpha \cos(\varphi_v - \varphi)\}$, $k_0 = \omega/c_0$, $\omega = 2\pi f$. Здесь индексом $\langle 0 \rangle$ обозначены значения различных параметров в начальной точке луча $\mathbf{R}_0(x_0, y_0, z_0)$. Угол выхода луча α определяется в вертикальной плоскости как угол между нормалью к фазовому фронту волны в точке \mathbf{R}_0 и горизонтом. Углы φ и φ_v описывают азимутальные направления данной нормали и скорости ветра \mathbf{v}_0 соответственно. Вектор \mathbf{a} лежит в горизонтальной плоскости и направлен под углом φ . В каждой точке луча он сохраняет постоянное значение и имеет смысл горизонтальной компоненты волнового вектора $\mathbf{K}(z)$.

Уравнение луча в таком виде справедливо только для участка луча до точки его поворота. Оно легко обобщается на случай наличия точки поворота на высоте z_{Π} путем замены

$$\int_{z_0}^{z'} dz \rightarrow \left(\int_{z_0}^{z_{\Pi}} + \int_{z'}^{z_{\Pi}} \right) dz,$$

где z' – высота конечной точки луча. Аналогично осуществляется обобщение (2) на случай нескольких точек поворота луча при многократном его отражении от земли.

В соответствии с классификацией лучей в [4] для случая волноводного распространения волн различаются четыре типа лучей в зависимости от того, на какой ветви луча (нисходящей или восходящей) находятся источник и приемник. В описываемом комплексе базовыми для расчетов звукового давления являются лучи типа <верх – низ> (см. рис. 2, б). Характеристики данных лучей рассчитываются по алгоритму, основанному на прямом решении точного уравнения луча с известным числом точек его поворота, а характеристики лучей других типов – из приближенных соотношений, используя при этом результаты расчетов базовых лучей. В энергетических расчетах наличие других лучей под тем же номером i , не относящихся к типу <верх – низ>, учитывается как интерференционные поправки L_{3i} к звуковому давлению L_p , обусловленному наличием только i -го базового луча. С этой целью используется соотношение [5]

$$L_3 = -10 \lg \left\{ e^{-2\sigma_\chi^2} [1 + Q^2 (s/s_0)^2] + 2 Q (s/s_0) e^{2\sigma_\chi^2 - D_s(\rho)} \cos [k_0 (s - s_0) + \theta] \right\},$$

где Q – модуль коэффициента отражения звука от подстилающей поверхности по амплитуде; θ – фаза этого коэффициента; σ_χ^2 – относительная дисперсия флуктуаций логарифма амплитуды акустического сигнала в атмосфере; D_s – структурная функция флуктуаций разности фаз прямой и отраженной волн; s и s_0 – длины трасс распространения этих волн от источника к приемнику ($|s - s_0| \ll s, s_0$); ρ – эффективное поперечное расстояние между их трассами. Величины σ_χ^2 и D_s вычисляются здесь по формулам из [6], а Q и θ – на основе известной модели Делани–Безли для комплексного акустического импеданса подстилающей поверхности.

При расчете базового луча под номером i известными величинами являются координаты x' и y' его конечной точки и число точек его поворота. Используя эти данные, требуется найти значение углов выхода i -го луча α_i и φ_i , т.е. решить задачу его нацеливания в заданный пункт. Аналитическое решение этой задачи при произвольных профилях $c(z)$ и $v(z)$ получить из (2) невозможно. Поэтому для ее решения применяется метод дихотомии [7]. В этом алгоритме приходится многократно вычислять интегралы вида (2), что заметно сказывается на времени счета. Высоту точки поворота i -го луча $z_{\text{пр}}$ находим при каждой итерации из уравнения $q(\alpha_i, \varphi_i, z_{\text{пр}}) = 0$, используя текущие в данной итерации значения углов выхода луча α_i и φ_i .

При решении задачи нацеливания луча полагается, что $\varphi_i = \arctg(\bar{v}_\perp/c)$, где \bar{v}_\perp – среднее вдоль луча значение поперечного ветра, а итерационный поиск осуществляется только по углу α_i . Численное сравнение с точной траекторией луча показало, что допускаемые в этом случае ошибки по α_i и φ_i намного меньше угловой ширины диаграммы направленности реального источника шума и поэтому не могут заметно отразиться на результатах расчета звуковых давлений. Например, при $d = 5$ км, $v = 12$ м/с и угле 45° между направлениями ветра и трассы ошибки оценивания α_i и φ_i при таком приближении имеют значения $0,6$ и $0,5^\circ$ соответственно.

После того как определены значения α_i и φ_i для всех лучей с номерами $N_{\min} \leq i \leq N_{\max}$ ($N_{\min} \geq 1, N_{\max} \geq N_{\min}$), становится возможным рассчитать $L_{\text{кми}}, L_{\text{ти}}, L_{\text{зи}}, L_{\text{д.ни}}$ и $L_{\text{пи}}$, а также Q_i . Величина $L_{\text{пи}}$ определяется здесь путем вычисления фактора фокусировки волны для каждого луча в его конечной точке [8]. Вследствие многолучевости распространения звука в данном режиме уравнение энергетического баланса усложняется и имеет вид

$$L_{\text{н}}(f) = L_{\text{н}}(f) + 10 \lg \left\{ \sum_{N_{\min}}^{N_{\max}} (Q_i^{2(i-1)} 10^{L_{\text{ци}}(f)/10}) \right\}, \text{ дБ}, \quad (3)$$

где аналогично (1) $L_{\text{ци}} = L_{\text{кми}} + L_{\text{ти}} + L_{\text{зи}} + L_{\text{д.ни}} + L_{\text{пи}}$. Поскольку $Q_i < 1$, то в приближенных расчетах оказывается достаточным учитывать только 3–4 первых члена, суммируемых в (3). Допускаемая при этом ошибка в оценке $L_{\text{н}}(f)$ не превысит $0,1$ дБ.

При расчете антиволноводного режима дополнительно рассматриваются лучи, относящиеся к рассеянному звуку. В этом случае каждой i -й точке рассеяния звука \mathbf{R}_{pi} соответствует пара лучей, содержащая прямой (п) и рассеянный (р) лучи. В результате весь лучевой путь

распространения звука от источника до точки его рассеяния \mathbf{R}_{ri} и от нее до приемника в точке \mathbf{R}' , удаленной от источника на горизонтальное расстояние d , описывается системой уравнений

$$x_{pi} + x_{ri} = d; y_{pi} + y_{ri} = 0, \quad (4)$$

где $x_{pi} = (x_{ri} - x_0)$, $y_{pi} = (y_{ri} - y_0)$, $x_{ri} = (x' - x_{ri})$, $y_{ri} = (y' - y_{ri})$; $|x_{pi}|$ и $|y_{pi}|$ – длины проекций прямого луча от источника до точки \mathbf{R}_{ri} на оси x и y соответственно; $|x_{ri}|$ и $|y_{ri}|$ – то же самое для рассеянного луча от \mathbf{R}_{ri} до пункта \mathbf{R} . Полагается, что ось x направлена вдоль прямой, соединяющей источник и приемник. Величины, входящие в левые части равенств (4), также рассчитываются на основе уравнения луча (2) и в зависимости от местоположения точки рассеяния \mathbf{R}_{ri} могут иметь как положительное, так и отрицательное значение.

Расчет звукового давления в зоне акустической тени основывается на теории однократного рассеяния звука в турбулентной атмосфере [6].

В этом приближении уравнение энергетического баланса для антиволноводного режима можно представить в общем виде как

$$L_n(f) = L_n(f) + 10 \lg \left\{ \int_V (10^{L_c(\mathbf{R}_r, f)/10}) dV \right\}, \text{ дБ}, \quad (5)$$

где интегрирование проводится по точкам рассеяния звука \mathbf{R}_r , лежащим вне области акустической тени.

Функция $L_c(\mathbf{R}_r, f)$ в (5) описывает полное ослабление звука вдоль прямого и рассеянного лучей, пересекающихся в точке \mathbf{R}_r . С учетом (1)

$$L_c = (L_{к.м} + L'_{к.м}) + (L_T + L'_T) + (L_3 + L'_3) + (L_p + L'_p) + L_{д.н} + L_d, \quad (6)$$

где штрих указывает, что данное слагаемое относится к ослаблению рассеянной волны. Дополнительное слагаемое L_d в (6) учитывает, какая доля энергии прямой волны переходит в энергию звука, рассеянного в направлении приемника. Его можно вычислить на основе выражения для поперечного сечения рассеяния звука в атмосфере с учетом значений C_T^2 и C_V^2 [6].

Центр объема интегрирования V в (5) совпадает с местоположением точки \mathbf{R}_r , для которой суммарные энергетические потери по трассе распространения звука будут минимальными. Обычно она лежит на прямом луче, скользящем вдоль верхней границы зоны акустической тени (см. рис. 2, в). Геометрические размеры V зависят от требуемой точности вычисления $L_n(f)$. При определении последних в комплексе учитывается, что в атмосфере интенсивность звука, рассеянного под углами $90^\circ \leq \xi \leq 180^\circ$, намного меньше, чем интенсивность звука, рассеянного в переднюю полусферу. Также принимается во внимание функция направленности источника $F_{д.н}(\alpha, \varphi, f)$ и тот факт, что при удалении точки \mathbf{R}_r от приемника значения $L_c(\mathbf{R}_r, f)$ резко уменьшаются.

При вычислении (5) в качестве переменных интегрирования используются углы выхода прямого луча (α_n и φ_n) и вертикальный угол прихода рассеянного луча в точку $\mathbf{R}'(\alpha_p)$. Поэтому они являются известными величинами. При таком подходе итерационная задача в отличие от случая волноводного распространения звука здесь решается из пары уравнений (4) с учетом (2) относительно азимутального угла прихода рассеянного луча φ_p и высоты z_r точки рассеяния \mathbf{R}_r . Для этой цели также применяется метод дихотомии. Она повторяется для каждого набора дискретных значений α_n , φ_n и α_p , используемого при численном интегрировании в соответствии с (5). Для случая импульсного шума внутри интеграла в (5) дополнительно вводится весовая функция вида $M[t - \tau(\alpha_n, \varphi_n, \alpha_p)]$, учитывающая временную форму излучаемого сигнала $M(t)$. Здесь t – текущий момент времени, а $\tau(\alpha_n, \varphi_n, \alpha_p)$ – время распространения звука вдоль лучевой трассы, задаваемой значениями α_n , φ_n и α_p .

При выполнении расчетов каждого из рассмотренных режимов распространения шума на экране монитора осуществляется построение графических изображений лучевой картины и

амплитудно-частотной характеристики шума в заданном пункте, выводится таблица звуковых давлений шума на фиксированных частотах, отличающихся на терцию, а также значения некоторых параметров, характерных для данного режима. Кроме рассмотренных в комплексе имеется дополнительная программа, которая осуществляет расчеты и графическое построение диаграмм распределения звуковых давлений шума по площади в окрестности источника.

Комплекс тестировался на работоспособность в диапазоне дальностей d от 100 м до 10 км при различных значениях скорости ветра от 0 до 25 м/с и градиентов температуры от -40 град/км до $+40$ град/км. Вычислительная погрешность оценки звукового давления в случае расчета волноводного режима составляет 0,1 дБ, а в случае расчета антиволноводного режима 0,5 дБ. Увеличение погрешности в последнем случае связано только с увеличением проводимых при этом вычислений и является компромиссом между достигаемыми точностью и временем решения задачи. Время, необходимое для отработки всех задач, решаемых комплексом, для указанного типа компьютера не превышает 2 мин. Комплекс содержит оригинальные алгоритмические разработки, существенно уменьшающие время счета.

Также рассматривалась чувствительность точности прогноза к ошибкам задания метеорологической информации. Оказалось, что точность прогноза звукового давления будет не менее 1 дБ, если p_a задавать с ошибкой не более 100 мм рт.ст.; v и φ_v – с ошибками не более 0,5 м/с и 10° соответственно; T – с ошибкой не более 1° , U – с ошибкой не более 10% при расчете для частот ниже 2 кГц и не более 3% при расчете в частотном диапазоне 2–4 кГц. Относительные ошибки задания C_t^2 и C_v^2 в случаях расчета нейтрального и волноводного режимов не должны превышать 300%, а при расчете антиволноводного режима – 100%. Было выявлено, что практически всегда можно не учитывать изменение величин p_a и U с высотой. Последнее также справедливо для C_t^2 и C_v^2 , но только при расчетах нейтрального или волноводного режимов. Для величин v , φ_v , T , а также C_t^2 и C_v^2 при расчете антиволноводного режима, требуется обязательно задавать их профили. При этом наблюдается высокая чувствительность к точности задания их градиентов. Например, градиент температуры требуется задавать с точностью не менее чем 10^{-3} град/м.

Комплекс прошел натурные испытания. При проведении экспериментальных исследований использовалась акустическая излучающая система мощностью 1,8 кВт, включающую антенную решетку из $6 \times 4 = 24$ рупорных громкоговорителей и 6 усилителей мощности с единым микшерным пультом. Средний уровень излучаемого звука на расстоянии 1 м от источника составлял примерно 138–147 дБ в диапазоне частот от 315 Гц до 4 кГц. Вдоль двух приземных трасс распространения звука длиной до 6 км на различных расстояниях было организовано по три пункта сбора данных о звуковом давлении, измеряемом операторами с помощью шумомеров через октавные фильтры. Для контроля состояния атмосферы использовались двухуровневый измеритель метеопараметров атмосферы (ИМА) и станция радиозондирования <Марс>. Последняя выдавала значения метеорологических параметров на высотах 0, 200, 400, 800 и 1200 м.

Акустический сигнал излучался сериями из 20 импульсов длительностью около 0,5 с с интервалами между ними в 2 с. Такая серия повторялась для каждой частоты от 315 Гц до 4 кГц через терцию. На этом заканчивался один цикл измерений длительностью около 25 минут. Всего было проведено 33 цикла измерений, соответствующих случаю волноводного распространения звука, и 19 циклов измерений, соответствующих случаю попадания операторов в зону акустической тени. В каждом из них были определены средние по 20 измерениям значения звукового давления $L_n(f)$ на всех контролируемых частотах f и при различных удалениях операторов d , а также их дисперсии и доверительные интервалы (с доверительной вероятностью, равной 0,95). Ошибка прогноза $S(f)$ на частоте f оценивалась как разность между вычисленным и измеренным значениями $L_n(f)$.

На рис. 3 и 4 приведены примеры сравнения вычисленных и экспериментальных значений звукового давления для одного цикла измерений при волноводном и антиволноводном режимах соответственно. Вследствие сильного затухания звука на частотах выше 2 кГц сигнал на этих частотах обычно оказывался ниже уровня окружающего шума. Поэтому экспериментальные данные для используемых длин трасс d получены в основном для частотного диапазона 315–2000 Гц. В целом частотные зависимости вычисленных и измеренных значений звукового давления в этом диапазоне хорошо согласуются.

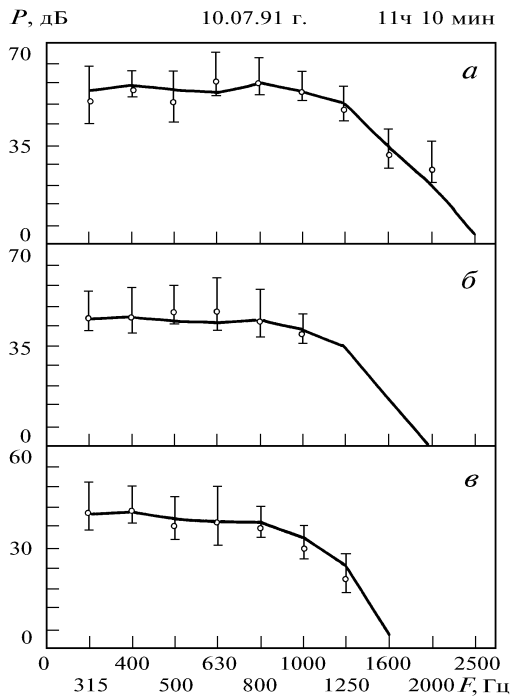


Рис. 3. Звуковое давление (дБ) в случае волноводного режима при различных длинах трассы d в зависимости от частоты f излучаемого сигнала: $a - d = 3000$ м; $b - d = 4500$ м; $v - d = 6000$ м. Сплошные линии – расчетные значения; кружки – измеренные значения; | – доверительные интервалы

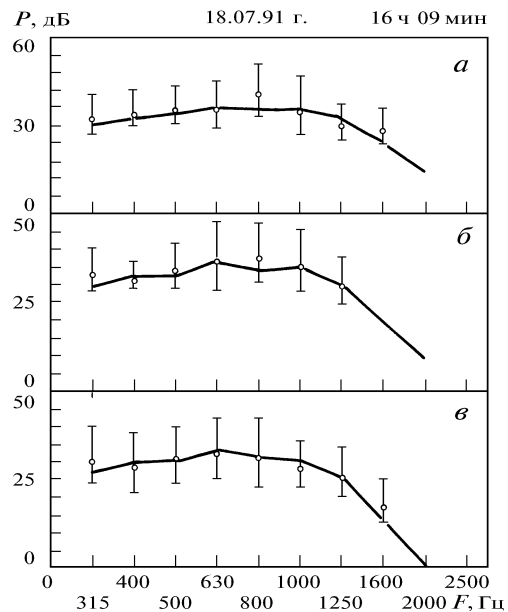


Рис. 4. Звуковое давление (дБ) в случае антиволноводного режима при различных длинах трассы d в зависимости от частоты f излучаемого сигнала: $a - d = 3575$ м; $б - d = 4135$ м; $в - d = 4800$ м. Сплошные линии – расчетные значения; кружки – измеренные значения; | – доверительные интервалы

В экспериментах было обнаружено, что основным источником ошибок прогноза является неточное задание метеорологической информации. Выявленные ошибки задания этой информации можно разбить на три группы.

Во-первых, метеорологические данные со станции радиозондирования поступали через относительно большой интервал времени, примерно равный 2 ч. Время сбора информации о звуковых давлениях по одному циклу измерений, указанное выше, также превышало величину, обычно принимаемую за интервал стационарности метеорологических полей. Поэтому при нестабильной метеорологической обстановке, когда средние профили метеорологических параметров сильно и относительно быстро меняются во времени, качество прогноза в проведенных экспериментах должно ухудшаться.

Во-вторых, существует методическая ошибка, связанная с использованием предположения о горизонтальной однородности метеорологических полей в атмосфере. Наконец, всегда существуют приборные ошибки самих измерительных средств.

При проведении данных экспериментов в основном преобладали стабильные метеорологические условия. Обычно наблюдался ветер с малой дисперсией его направления, примерно равный на высоте 2 м величине 5–7 м/с, и отрицательный градиент температуры порядка 8–10 град/км. Как правило в этом случае для всех контролируемых частот обнаруживалась ошибка прогноза не более 1–3 дБ. Плохие результаты прогноза ($S \approx 10$ дБ), относящиеся в случае волноводного распространения звука к четырем циклам измерений и в случае антиволноводного его распространения – к двум циклам, были получены только в течение одного рабочего дня. В этот день несколько раз наблюдалась кратковременная гроза, ветер был очень слабым порядка 1–2 м/с с часто меняющимся направлением в диапазоне углов $150^\circ < \varphi_v < 360^\circ$, градиент температуры имел значение примерно – 5 град/км. Такие условия оказались трудными для правильной диагностики режима распространения звука, поскольку он мог неоднократно меняться для одной и той же трассы даже в течение одного часа.

Итоговые результаты экспериментальной оценки качества прогноза уровня звука в частотном диапазоне 315–2000 Гц для различных дальностей и режимов распространения приведены в таблице.

Волноводный режим: 33 цикла × 20 серий				Антиволноводный режим: 19 циклов × 20 серий			
d , м	\bar{S} , дБ	P_6	P_i	d , м	\bar{S} , дБ	P_6	P_i
3000	+3,2	0,67	0,68	3575	-2,3	0,83	0,78
4500	+2,3	0,67	0,68	4135	-2,3	0,82	0,75
6000	+1,5	0,80	0,74	4800	-1,5	0,82	0,82

Здесь \bar{S} – среднее значение ошибки прогноза по всем циклам; P_i – вероятность попадания прогнозируемого давления в доверительный интервал; P_6 – вероятность ошибки прогноза, не превышающей 6 дБ. Учитывая трудности контроля метеорологических условий и их изменчивость, полученные нами средние ошибки прогноза в 2–3 дБ являются довольно хорошим результатом.

В заключение укажем на широкую область применения описанного программного комплекса или всей системы оперативного прогноза. Это оперативное оценивание уровня шума в удаленном пункте; исследование шумового загрязнения атмосферы проектируемым образцом техники; расчет санитарных зон промышленных объектов по создаваемому шуму в атмосфере; построение карт распределения шума в населенных пунктах; оценивание слышимости звуко-вещательных установок и т.д.

Авторы выражают благодарность В.А. Гладких и А.Ю. Лебедеву за оказанную помощь при проведении полевых измерений.

1. Б л о х и н ц е в Д. И. Акустика неоднородной движущейся среды. М.: Наука, 1981. 208 с.
2. О с т а ш е в В. Е. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1989. Т. 25. № 9. С. 899–915.
3. К р а с н е н к о Н. П. Акустическое зондирование атмосферы. Новосибирск: Наука, 1986. 166 с.
4. Б р е х о в с к и х Л. М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 342 с.
5. А б р а м о в Н. Г. // Распространение звуковых и оптических волн в атмосфере. Томск: ИОА СО РАН СССР, 1988. С. 97–100.
6. Т а т а р с к и й В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
7. К а л и т к и н Н. Н. Численные методы. М.: Наука, 1978. 512 с.
8. Б р е х о в с к и х Л. М., Л ы с а н о в Ю. П. Теоретические основы акустики океана. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 264 с.

Институт оптики атмосферы
СО РАН, Томск

Поступила в редакцию
12 июля 1993 г.

N. G. Abramov, A. Ya. Bogushevich, V. I. Karpov, N. P. Krasnenko, A. A. Fomichev. **Possibility of Operatively Forecasting Propagation of Acoustic Noise in the Ground Atmospheric Layer with the Account for Meteorological Conditions.**

In this paper we present a description of a program package <Acoustics of Open Spaces> intended for operative assessments of the mean field of sound pressures from a remote sound source in the ground atmospheric layer. The program complex allows for the characteristics of the acoustic noise source, vertical profiles of the main meteorological parameters, characteristics of an underlying surface, and the parameters of the atmospheric turbulence. Some results obtained with this complex in field tests for distances from an acoustic noise source up to 6 km are also presented in the paper.