АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXX 1984 Вып. 2

УДК 551.596.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЛАБЛЕНИЯ ПРИЗЕМНОЙ ЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ

Бочкарев Н. Н., Красненко Н. П., Муравский В. П.

Обсуждается возможность прогнозирования ослабления звуковой волны для трасс известной протяженности. Приводятся результаты экспериментальных исследований компонент ослабления приземной звуковой волны, обусловленных влиянием подстилающей поверхности, турбулентностью и рефракцией звука.

Теоретические и экспериментальные исследования вопросов распространения звука в атмосфере ведутся еще с середины минувшего века. Однако прогнозировать ослабление звука при его распространении вдоль земной поверхности довольно сложно даже для расстояний в сотни метров. Достаточно указать, что для такого прогноза необходимо знание не только большого числа метеовеличин, но также данных о рельефе и типе подстилающей поверхности, о характеристиках направленности, высотах расположения источника и приемника звука над земной поверхностью. Необходимость учета всего многообразия факторов, влияющих на ослабление звука, громоздкость вычислений по имеющимся теоретическим и эмпирическим соотношениям не позволяют получать оперативную и надежную информацию, важную для решения ряда прикладных задач. В этих условиях положительное значение приобретает разумное пренебрежение отдельными факторами, влияющими на ослабление звука, но слабо проявляющимися в конкретной ситуации.

Полное ослабление звуковой волны на трассе распространения представляется в виде: $L=L_{сф}+L_{доп}$, где $L_{сф}$ — ослабление, обусловленное сферической расходимостью, $L_{доп}$ — дополнительное ослабление. Прогнозируемая величина $L_{доп}$ состоит из суммы ослаблений, обусловленных влиянием подстилающей поверхности $L_з$, турбулентностью атмосферы $L_т$, классическим и молекулярным поглощениями $L_{км}$, а также рефракцией звука за счет стратификации ветра $L_{рв}$ и температуры $L_{рт}$ (величины $L_{рв}$ и $L_{рт}$ могут быть как положительными, так и отрицательными).

В подавляющем большинстве экспериментальных работ вклады компонент, входящих в $L_{доп}$, не разделялись, что приводило к получению ненадежных, а подчас противоречивых результатов. В тех же немногих работах, где приводилось такое разделение, это делалось некорректно. Например, в работе [1] были проведены исследования распространения звука на приземных трассах, которые дают качественную картину изменения $L_з$. Поскольку авторы не измеряли величины $L_т$ и $L_{рв}$, то сделать конкретные количественные выводы о величине $L_з$, особенно для частот выше 500 Гц, не представляется возможным.

Теоретические оценки величины $L_т$ проводились в работе [2] на основе малоуглового приближения, широко используемого в теории распространения оптического излучения через турбулентность. При этом использовалось допущение $\lambda \ll L_0$, где λ — длина волны, L_0 — внешний масштаб турбулентности. Однако в более поздней работе [3] ставятся под сомнение выводы работы [2], поскольку степень аппроксимации и ошибки, появляющиеся при замене условия $\lambda \ll l_0$, используемого в оптике, на условие $\lambda \ll L_0$ — для акустики, пока неизвестны (l_0 — внутренний масштаб турбулентности). Сравнение теории [2] с экспериментом для случая приземных

трасс отсутствует, так как сколь-нибудь надежных измерений величины $L_т$ не проводилось из-за сложности выделения $L_т$ из $L_{доп}$.

Таким образом, необходимость в проведении экспериментов по измерению ослабления звука на приземных трассах очевидна. Подобные измерения в дальнейшем позволят решить обратную задачу, т. е. для конкретных атмосферных условий, типов подстилающей поверхности, геометрий расположения источника и приемника, прогнозировать величину добавки $L_{доп}$.

Для изучения $L_т$, $L_з$, $L_{рв}$ при приземном распространении звука, в весенние периоды 1981—1982 г. г. были проведены измерения, позволившие на основе селекции большого экспериментального материала разделить указанные типы ослаблений и изучить каждое из них в отдельности. Полученные результаты были сопоставлены с имеющимися в литературе теоретическими разработками.

Было оборудовано пять трасс протяженностями R=30, 154, 250, 375, 835 м. Подстилающая поверхность представляла собой ровное вспаханное поле. Источником звука служил громкоговоритель рупорного типа электрической мощностью 50 Вт, который возбуждался на шести фиксированных частотах от 125 до 4000 Гц через октаву. Уровень звука измерялся точными импульсными шумомерами типа PSI-00017 с встроенными октавными фильтрами. Приемные микрофоны устанавливались либо в параболоиды с диаметром 51 см и фокусным расстоянием 6,25 см, либо в ветрозащитные шары, изготовленные из металлических каркасов с натянутой на них тканью.

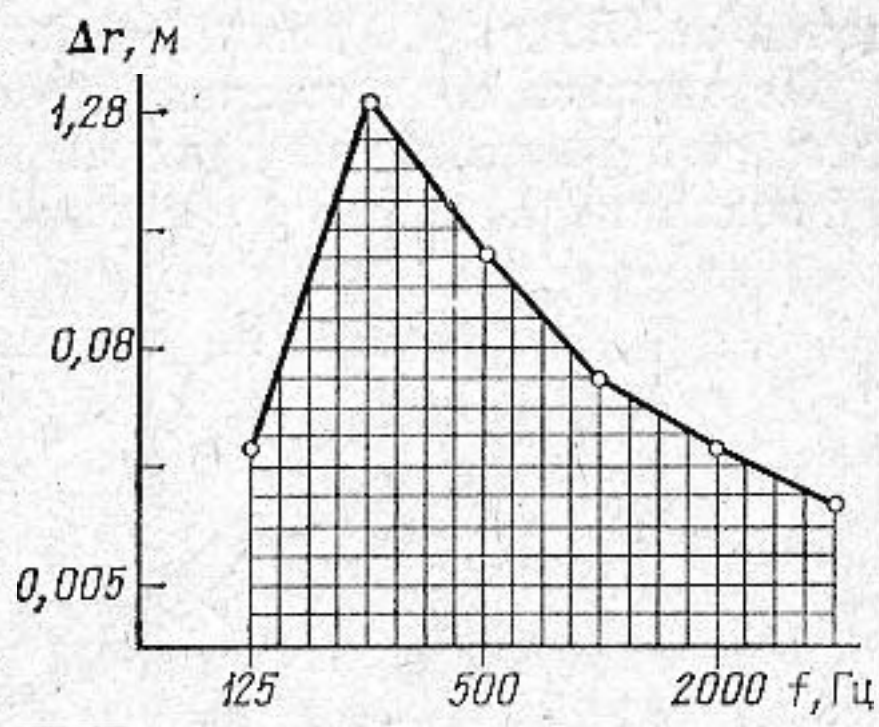
Микрофоны и громкоговоритель размещались на мачтах с регулируемой высотой до 8 м. Поступающие с микрофонов на шумомеры непрерывные сигналы фильтровались октавными фильтрами, детектировались и записывались шлейфовым осциллографом на фотобумагу с целью последующей обработки на большой ЭВМ. На фотобумаге регистрировался также сигнал, снимаемый с датчика ветра и несущий информацию об изменениях направления ветра. Такой датчик располагался либо в месте приема, либо в месте излучения акустического сигнала. Для контроля за уровнем звука на оси излучателя в 1,5 м от него помещался дополнительный микрофон. Регистрация на фотобумагу проводилась циклами, содержащими последовательные записи длительностью 20—30 с для каждой из фиксированных частот. Из всего экспериментального материала было отобрано и обработано около сорока таких циклов. Эксперименты проводились преимущественно в дневное время с соответствующим метеообеспечением (измерение температуры, давления, влажности, скорости и направления ветра). Диапазоны изменения метеовеличин во время проведения экспериментов оставались в пределах: температура —8—26° С, относительная влажность 68—100%, давление 743—758 мбар, средняя скорость ветра 0—12 м/с.

Ослабление звука за счет классического и молекулярного поглощений наиболее тщательно исследовано (подробно рассмотрение этого вопроса можно найти, например, в работе [4]). Поэтому $L_{км}$ рассчитывалось по известным эмпирическим формулам. В наблюдаемых диапазонах изменения метеовеличин значение $L_{км}$, как правило, было малым по сравнению с L, составляя от него не более 1,5% для частоты f=4 кГц и длинной трассы. При последующей интерпретации вкладов различных типов ослаблений полученное таким образом значение $L_{км}$ наряду с $L_{сф}$ вычиталось из измеренного полного ослабления звука.

Для уменьшения влияния рефракционных ослаблений на измеряемые значения $L_{доп}$ при исследовании $L_з$ и $L_т$ эксперименты проводились при поперечных к трассе распространения ветрах, когда градиентом скорости ветра в направлении распространения звука можно пренебречь, и в условиях облачной погоды, когда температурный градиент минимален [5]. Кроме того, для устранения попадания приемника в область «звуковой тени» высоты источника и приемника выбирались больше предельных, рассчитанных по асимптотической формуле (2) работы [6] при заданном R и типичном для наших условий значении градиента температуры, взятого из работы [5].

Однако исследование свойств $L_з$ требует и более низкого расположения источника и приемника. В этом случае для выявления попадания приемника в область «звуковой тени» служила оценочная частота 63 Гц (известно [7], что рефракционное ослабление для низких звуковых частот уже на трассах в сотни метров вносит основной вклад в $L_{доп}$). Если измеренное полное ослабление для этой частоты отличалось от $L_{сф}$ более чем на 1 дБ, то такие циклы измерений из интерпретации результатов исключались.

Было также выяснено, что ошибка в определении ослабления звука, появляющаяся из-за рассогласования приемной и передающей диаграмм направленностей, вследствие «выдувания» ветром оставалась пренебрежимо малой по сравнению с общей погрешностью измерений (ширина диаграмм направленностей излучателя и приемников на частоте 4 кГц составляла 15° по уровню половинной мощности). Максимальная аппаратурная ошибка определения ослабления не превышала ±1 дБ.



Фиг. 1.

Таким образом, учитывая изложенное выше, из полного ослабления была выделена величина $L_т+L_з$ и исследованы влияющие на нее факторы. Таковыми оказались: геометрия эксперимента (расстояние между источником и приемником звука R, высоты расположения источника $h_и$ и приемника $h_п$ над поверхностью земли) и скорость среднего поперечного ветра $\langle v_\perp \rangle$.

При приземном распространении звуковых колебаний на приемник приходят две волны: непосредственно прошедшая от источника к приемнику и зеркально отраженная поверхностью земли. Вследствие определенной разницы хода $\Delta r=\sqrt{R^2+(h_и+h_п)^2}-R$ между ними на приемнике должна наблюдаться интерференционная картина, отмечаемая увеличением или уменьшением уровня звука на определенных частотах. Во всех случаях изменения R, $h_и$, $h_п$ в наших экспериментах наблюдался только первый ярко выраженный минимум звукового давления на приемнике, приходящийся на частоты 250—500 Гц. Это можно объяснить разрушением фазовых фронтов волн турбулентностью и их некогерентным сложением на приемнике для более высоких частот.

С целью выяснения влияния геометрии эксперимента на величину $L_{доп}$ для каждой из трасс в одинаковых метеоусловиях варьировались $h_и$ и $h_п$ и измерялось ослабление звука (приемные микрофоны размещались в ветрозащитных шарах). Начиная с некоторых критических высот, что соответствовало определенной Δr, измеряемое ослабление начинало заметно возрастать с уменьшением $h_и$ или $h_п$. Поскольку контроль появления «звуковой тени» по изложенной выше методике показывал ее отсутствие на приемнике, то это увеличение ослабления было отнесено к резкому возрастанию вклада $L_з$. На основании проведенных измерений для различных частот была определена область изменений Δr (заштрихована на фиг. 1), вне которой можно не учитывать вклад $L_з$ в $L_{доп}$ с ошибкой, не превышающей 3 дБ. Выбирая, таким образом, Δr (что равноценно выбору $h_и$ и $h_п$ при заданном R) из фиг. 1, можно уменьшить величину ослабления звука на трассе распространения за счет уменьшения доли $L_з$, особенно на частотах 250, 500 Гц.

Большая часть измерений, использованных для изучения свойств величины $L_т$, была проведена при таких Δr, когда величиной $L_з$ можно пренебречь. В тех же измерениях, где нельзя было ею пренебречь, удалось на высоких частотах разделить $L_т$ и $L_з$ описанным ниже способом. На фиг. 2 для четырех трасс распространения и трех значений $\langle v_\perp \rangle$ приведены частотные зависимости $L_з+L_т$ (приемные микрофоны размещались в параболоидах). Они показывают рост этого ослабления с увеличением R и уменьшением $\langle v_\perp \rangle$.

Учитывая результаты работ [8, 9], на частотах более 500 Гц при малых $\sin\Psi$ можно приближенно записать

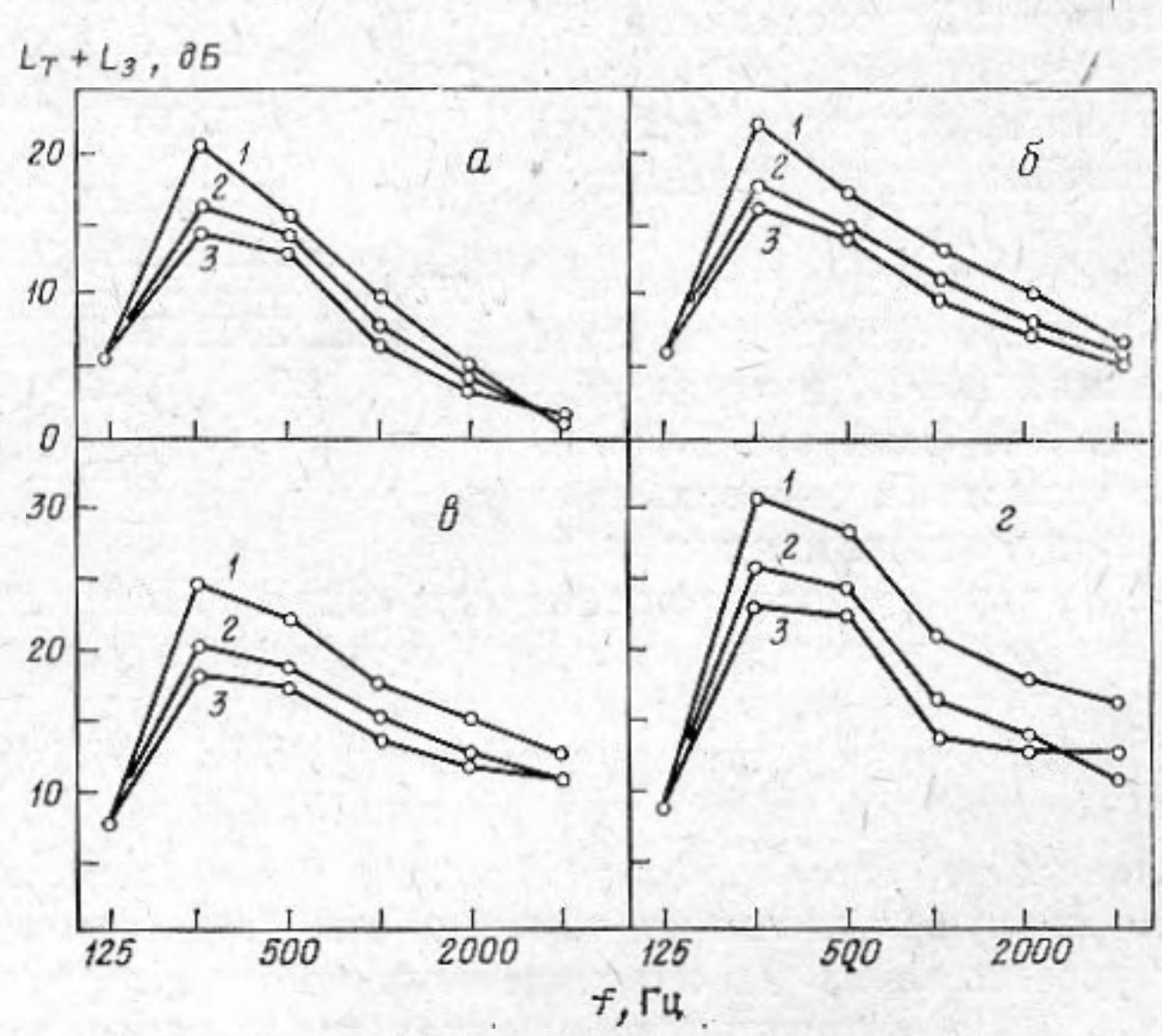
$$L_з = -10\lg\left(1+Q^2-2Q\cos(k\Delta r)\right), \qquad (1)$$

где

$$Q \simeq \left|\frac{B\sin\Psi - 1}{B\sin\Psi + 1}\right|, \qquad B = 1 + 9{,}08\left(\frac{f}{\sigma}\right)^{-0{,}75},$$

$k=2\pi f/c$ — волновое число, c — скорость звука, Ψ — угол падения звуковой волны на подстилающую поверхность, σ — числовая константа, изменяющаяся от 150 до 400 для песчаных и вспаханных поверхностей.

Из анализа соотношения (1) следует, что при линейном изменении $\lg\Delta r$ (что равнозначно для малых Ψ линейному изменению $\lg R$) или $\lg f$ величина $L_з$ изменяется тоже линейно, а различные наклоны кривых



Фиг. 2. Частотная зависимость суммарного ослабления $L_т+L_з$ при $h_и=1.5$ м, $h_п=1$ м и скорости среднего поперечного ветра 0 (*1*), 3 (*2*), 5 м/с (*3*). Каждый график усреднялся по трем циклам измерений

$L_з+L_т$ (фиг. 2) на частотах более 1 кГц для разных R обусловлены только изменением $L_т$. Исходя из этого строилась зависимость $L_т$ от частоты для разных R (фиг. 3).

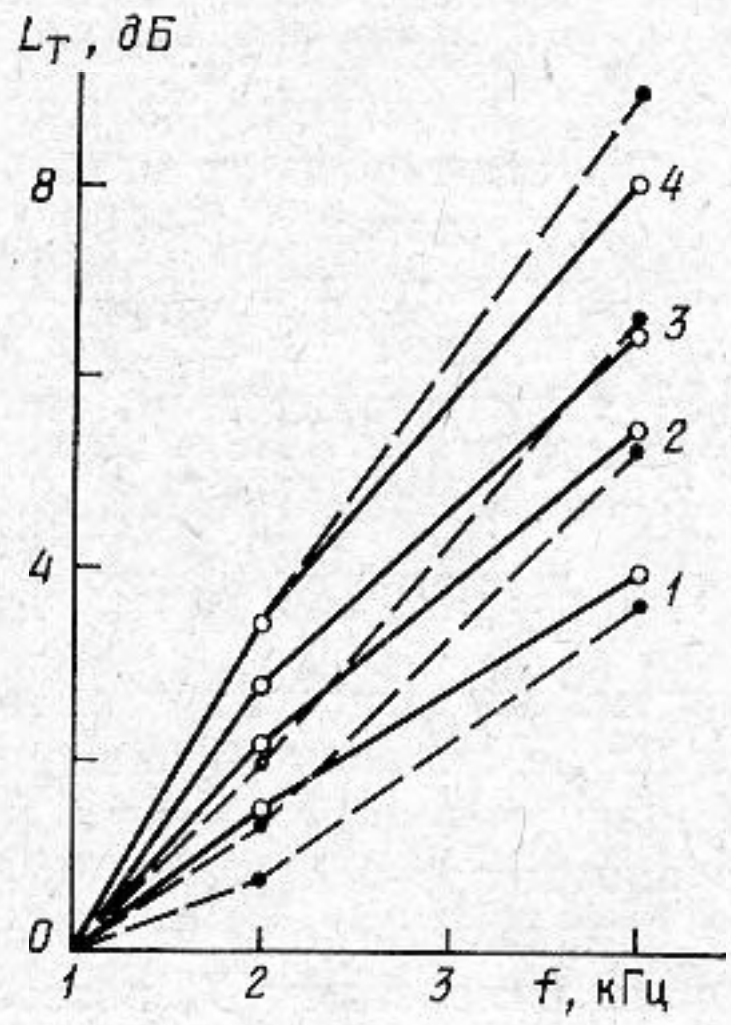
Теоретически влияние ветра на $L_з$ обсуждалось в работе [8]. Однако попытка автора этой работы ввести девиацию фазы, полученную Л. А. Черновым, в теоретическое выражение для расчета $L_з$ с целью учета влияния турбулентности не может быть признана вполне удовлетворительной, поскольку это выражение справедливо, когда максимальный разнос между лучевыми траекториями прямой и отраженной волн будет больше, чем характерный размер неоднородностей в среде, что не выполняется для низко расположенных над поверхностью земли источника и приемника. Расчет $L_з$ по формулам, взятым из работы [8], дает несколько завышенные значения $L_з$ по сравнению с полученными в эксперименте. Это можно объяснить наличием рассеяния звуковой волны на малые углы и соответствующим увеличением измеряемого уровня звука на приемнике, что в работе [8] не учитывается.

Для турбулентного ослабления в работе [2] получено выражение

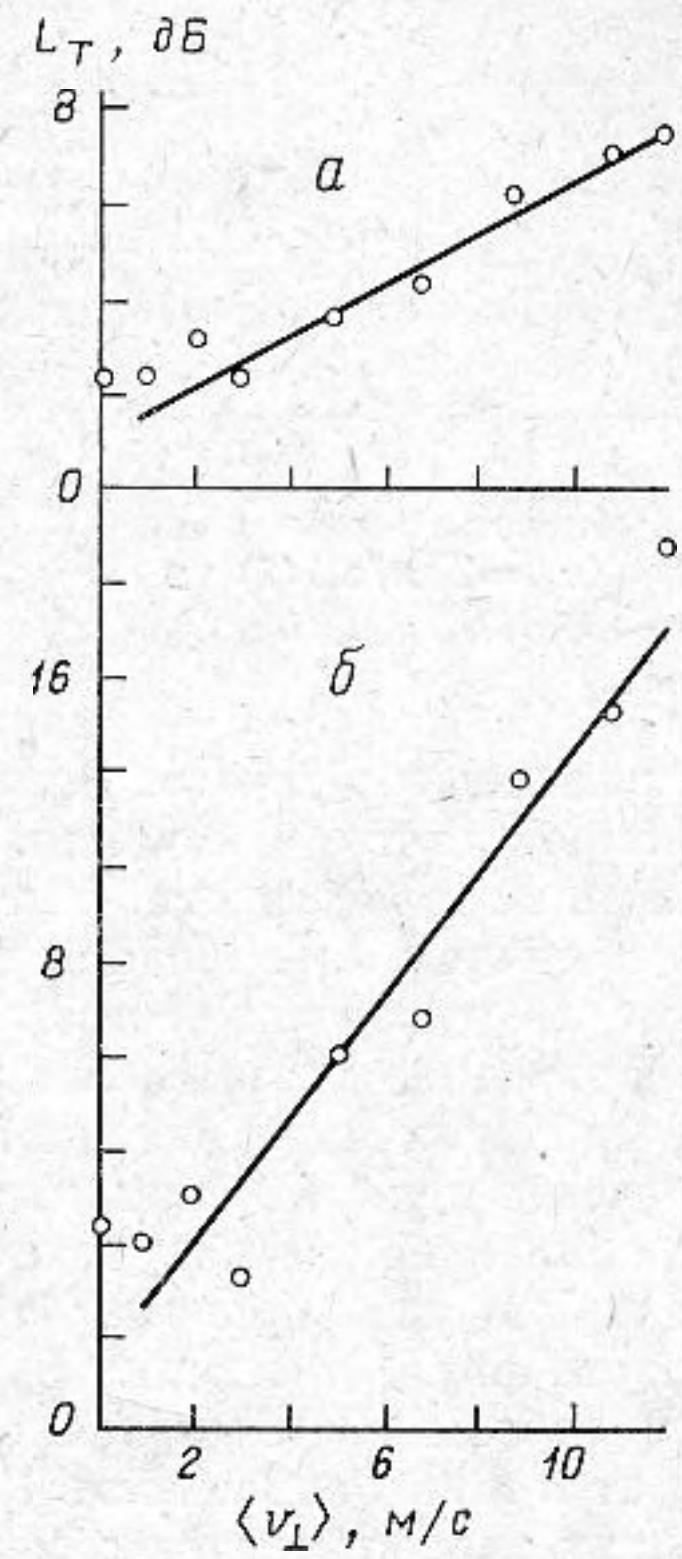
$$L_T = 10\lg\left(1 + 0{,}48k^{1\,1/6}D_0^2R^{5/6}C_n^{12/5}\right), \qquad (2)$$

где D_0 — диаметр излучателя, C_n — структурная постоянная показателя преломления. Поскольку сопутствующих измерений C_n в эксперименте не проводилось, то сравнить количественно значения $L_т$, рассчитанные по формуле (2), со значениями $L_т$ из эксперимента, не представляется воз-

можным. Однако сравнить ход теоретической и экспериментальной зависимостей $L_т$ от k и R можно. Для этого в соотношении (2) были подобраны коэффициенты перед $k^{12/5}R^{6/5}$ при $R=154$ м и $f=4$ кГц так, чтобы полученное значение $L_т$ было равно значению $L_т$ из эксперимента. Затем по той же формуле с теми же коэффициентами были рассчитаны значения $L_т$, но при других R и f, после чего полученные зависимости $L_т$ от f для различных R были совмещены в одной точке $f=1$ кГц и нанесены пунктирными линиями на фиг. 3. Теоретическая зависимость $L_т$ от R удовлетворительно совпала с результатами экспериментов. Однако частотный ход $L_т$, полученный из эксперимента, несколько иной, а именно лучшее соответствие получается, если в фор-



Фиг. 3



Фиг. 4

Фиг. 3. Частотная зависимость турбулентного ослабления при $\langle v_\perp \rangle=5$ м/с для различных длин трасс: 154 (*1*), 250 (*2*), 375 (*3*), 835 м (*4*). Сплошные линии – эксперимент, пунктирные – теория работы [2]

Фиг. 4. Турбулентное ослабление в зависимости от среднего поперечного ветра для $R=835$ м при $f=2$ кГц (*а*) и $f=4$ кГц (*б*)

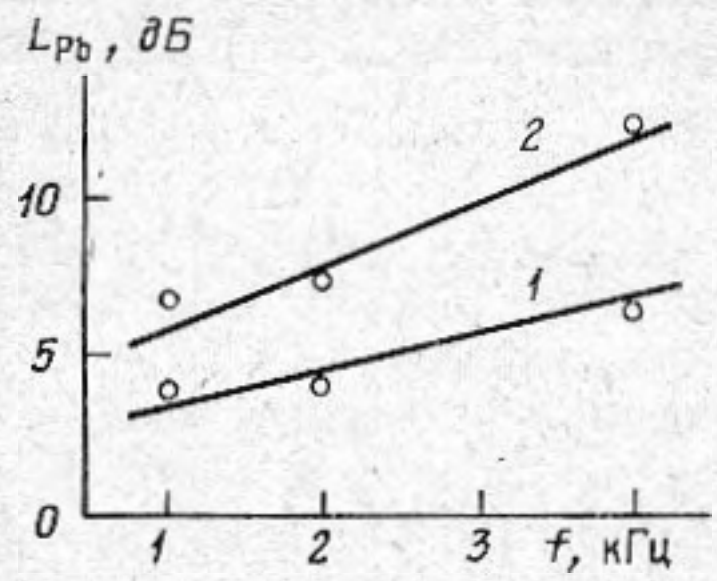
муле (2) k будет не в степени 12/5, а в степени 2.

Зависимости $L_т$ от $\langle v_\perp \rangle$ для $f=2$ и 4 кГц при $R=835$ м показаны на фиг. 4. Эти зависимости оказались близкими к линейным, т. е. $L_т \sim \alpha \langle v_\perp \rangle$, за исключением $\langle v_\perp \rangle < 2$ м/С. Причем коэффициент α с уменьшением длины трассы и частоты уменьшается от 1,3 до 0,5.

Если пренебречь флуктуациями температуры в приземном слое, то $C_n \approx C_v/c$, где C_v – структурная постоянная флуктуаций скорости ветра, c – скорость звука. Как правило, величина C_v^2 пропорциональна дисперсии переменной составляющей скорости ветра $\langle v^2 \rangle$, и если считать, что шероховатость подстилающей поверхности одна и та же, то интенсивность турбулентного потока $\sqrt{\langle v^2 \rangle}/\langle v \rangle$ почти постоянна и не зависит от средней скорости ветра $\langle v \rangle$. В этом случае можно считать, что приближенно выполняется соотношение $C_v \sim \langle v \rangle \sim C_n$. Следовательно, зависимость $L_т$ от $\langle v_т \rangle$, изображенная на фиг. 4, должна повторять зависимость $L_т$ от C_n, т. е. $L_т \sim \alpha C_n$. Отметим, что при скорости ветра, близкой к нулю, когда величиной $C_т$ уже нельзя пренебрегать по сравнению с C_v, значение $L_т \neq 0$ и, следовательно, все турбулентное ослабление происходит в основном за счет рассеяния на температурных неоднородностях ($C_т$ – структурная постоянная флуктуаций температуры).

Экспериментально проведенные оценки $L_т$ и $L_з$ позволили рассчитать величину $L_{рв}$ для различных R в зависимости от средней скорости парал-

лельного направлению распространения ветра $\langle v_{\parallel} \rangle$. Для получения значений $L_{рв}$ при некотором $\langle v_{\parallel} \rangle$ из общего ослабления звука по трассе наряду с $L_{км}$ и $L_{сф}$ вычитались значения $L_з$ и $L_т$, полученные в ранее проведенных измерениях при похожих метеоситуациях, но при поперечных направлению распространения ветрах. Оцененные экспериментальные значения $L_{рв}$ удовлетворительно согласуются с теорией [10] только для слабых ветров. Рассчитанные, согласно результатам работы [10], значения $L_{рв}$ при показателе степени скорости изменения ветра с высотой, равном 0,25, всегда оказывались больше значений, наблюдаемых в наших экспериментах. Зависимость $L_{рв}$ от частоты для двух значений $\langle v_{\parallel} \rangle$ изображена на фиг. 5.



Фиг. 5. Частотная зависимость $L_{рв}$ для $\langle v_{\parallel} \rangle$=2 м/с (*1*) и 5 м/с (*2*)

Результаты проведенных исследований показывают, что вклады компонент, входящих в $L_{доп}$, для различных частот сильно варьируются в зависимости от метеоусловий и геометрии эксперимента. Величина $L_{доп}$ на частотах 125–500 Гц полностью определяется взаимным расположением источника, приемника и подстилающей поверхности, а для «малых» значений Δr она может превышать величину $L_{сф}$. Модель работы [5] удовлетворительно описывает поведение $L_з$ для этих частот, когда $\langle v_{\perp} \rangle \to 0$. На высоких частотах $L_з$ удовлетворительно описывается упрощенной формулой (1), однако здесь начинается увеличение вкладов $L_т$ и $L_{рв}$ в величину добавки $L_{доп}$. Эти вклады растут с увеличением частоты.

При направленном излучении или приеме на высоких частотах для средних и больших значений $\langle v_{\perp} \rangle$, когда Δr не попадает в заштрихованную область фиг. 1, величина $L_{доп}$ почти полностью определяется $L_т$. Формула (2) работы [2] достаточно хорошо описывает поведение $L_т$ в зависимости от k и R. Зависимость $L_т$ от $\langle v_{\perp} \rangle$ близка к линейной. Проведение дальнейших экспериментов с сопутствующим измерением C_n позволит количественно сравнить результаты расчета по формуле (2) с экспериментальными данными. В условиях продольного ветра вклад величины $L_{рв}$ в $L_{доп}$ становится больше вклада $L_т$ на высоких частотах уже при скоростях ветра более 5 м/с. Оцененные значения $L_{рв}$ для различных $\langle v_{\parallel} \rangle$ оказались меньше, чем рассчитанные согласно [10]. Для оценок $L_{рв}$ необходимы эксперименты с измерениями высотного профиля скорости ветра.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Parkin P. H., Scholes W. E.* The horizontal propagation of sound from a jet engine close to the ground, at radlett.— J. Sound and vibrat., 1964, v. 1, p. 1–13.
2. *Brown E. H., Clifford S. F.* On the attenuation of sound by turbulence.— J. Acoust. Soc. Amer., 1976, v. 60, № 4, p. 788–794.
3. *Brown E. H., Hall F. F.* Advances in atmospheric acoustics.— Rev. Geoph. and Space Phys., 1978, v. 16, № 1, p. 1–78.
4. *Piercy J. E., Embleton T. F., Sutherland L. C.* Review of noise propagation in the atmosphere.— J. Acoust. Soc. Amer., 1977, v. 61, p. 1403–1418.
5. *Машкова Г. Б.* О профилях температуры воздуха и ветра в нижней части пограничного слоя атмосферы.— Тр. ИПГ. Вып. 2. Пограничный слой атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1965, с. 45–55.
6. *Fiener F. M., Keast D. N.* Experimental study of the propagation of sound over ground.— J. Acoust. Soc. Amer., 1959, v. 31, № 6, p. 724–733.
7. *Parkin P. H., Scholes W. E.* The horizontal propagation of sound from a jet engine close to the ground, at radfield.— J. Sound and vibrat., 1965, v. 2, p. 353–374.
8. *Chessell C. I.* Propagation of noise along a finite impedance boundary.— J. Acoust. Soc. Amer., 1977, v. 62, № 4, p. 825–834.
9. *Embleton T. F. W., Piercy J. E., Olson N.* Outdoor sound propagation over ground of finite impedance.— J. Acoust. Soc. Amer., 1976, v. 59, № 2, p. 267–277.
10. *Осаму Ф., Коити Т., Кодзо Х., Такео Я.* Влияние вертикального распределения скорости ветра и температуры на распространение звука. М: Всес. центр переводов, Пер. с яп. № В-64627, 1981.

Институт оптики атмосферы
СО АН СССР

Поступила в редакцию
11.XI.1982