АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том VIII 1962 Вып. 3

ОБ ОСЛАБЛЕНИИ ЗВУКА ПРИ ЕГО РАСПРОСТРАНЕНИИ В АТМОСФЕРЕ

И. А. Днепровская, В. К. Иофе, Ф. И. Левитас

Исследовано ослабление звука при его распространении в атмосфере в диапазоне частот 200—2000 *гц* как при отсутствии акустической тени, так и при ее наличии. Измерения проводились на расстояниях от 1,5 до 5 *км* на 12 трассах (в Ленинградской области). Измерение уровня у источника звука производилось с помощью объективного, а в точке приема — с помощью субъективного шумомера.

Результаты измерений показывают зависимость избыточного (за вычетом молекулярного затухания) ослабления звука от времени года, времени суток, характера трассы, расстояния и частоты. Какой-либо зависимости от направления и скорости ветра не установлено. Усредненная абсолютная величина избыточного ослабления в зависимости от условий распространения изменяется в пределах от 2 до 12 *дб/км* для частоты 300 *гц* и от 5 до 23 *дб/км* для частот 1800 до 2000 *гц*. Акустическая тень наблюдалась в среднем при 30% из общего числа наблюдений. Усредненная абсолютная величина избыточного ослабления при наличии акустической тени лежит в пределах от 20 *дб/км* при частоте 300 *гц* до 50 *дб/км* при частоте 1800 *гц*.

Ослабление звука при его распространении в атмосфере являлось предметом многочисленных исследований, что определялось, с одной стороны, теоретической и практической важностью этого явления и, с другой стороны, его сложностью. Сложность эта объясняется множественностью факторов, обусловливающих ослабление звука.

Если даже не рассматривать те случаи, когда имеет место явление акустической тени, порождаемой рефракцией звуковых лучей из-за действия вертикальных градиентов скорости ветра и температуры, то результаты экспериментов свидетельствуют, что, кроме классического и молекулярного затухания, в открытой атмосфере имеется дополнительное или, как мы его будем называть в дальнейшем, избыточное ослабление.

В последнее время исследователи склонны объяснять происхождение этого ослабления турбулентностью атмосферы. Однако до сих пор мы не имеем удовлетворительной количественной теории этого явления. Помимо того, следует ожидать дополнительного ослабления за счет ряда других факторов, например, влияния покрова и рельефа поверхности. Отсюда ясна важность экспериментального определения интегральной величины избыточного ослабления звука при его распространении в атмосфере в возможно более широком диапазоне частот и для достаточно больших расстояний.

К сожалению, в литературе до сих пор нет достаточно убедительных и согласующихся между собою данных о величине избыточного ослабления звука при его распространении в атмосфере на больших расстояниях и в достаточно широком диапазоне частот. Это побудило нас в свое время приступить к накоплению экспериментального материала с целью получения практических выводов о величине избыточного ослабления. Опыты проводились нами в течение трех лет (1952—1954 гг.), во все времена года, в дневное и в ночное время, на 12 трассах в пределах Ленинградской области на расстояниях от 1,5 до 5 *км*. Однако поскольку на пяти из этих трасс (трассы 2, 4, 6, 11 и 12) было выполнено незначительное число измерений, данные по этим трассам не обрабатывались. Поэтому

в дальнейшем приводятся результаты, полученные на семи трассах (трассы 1, 3, 5, 7, 8, 9 и 10). Всего на всех трассах было выполнено 159 наблюдений. Опыты проводились на частотах до 2000 *гц*. Измерений на более высоких частотах и на расстояниях, превышающих 5 *км*, не проводилось, поскольку это потребовало бы значительного увеличения мощности источника звука.

Величина полного ослабления звука β_r на расстоянии r от источника, за вычетом ослабления, вызываемого расхождением волнового фронта, может быть определена как

$$\beta_r = N - N_0 - 20 \lg r/r_0,$$

где N_0 — уровень интенсивности звука на малом расстоянии r_0 от источника, N — уровень интенсивности на интересующем нас расстоянии r от источника. Величина полного километрического ослабления, ввиду малости r_0 по сравнению с r, будет

$$\beta = \beta_r/(r - r_0) \cong \beta_r/r = (N - N_0 - 20 \lg r/r_0)/r.$$

Если, наконец, вычесть из β величину километрического молекулярного затухания γ, проще всего определяемого по известной номограмме Кнезера [1], то мы получим интересующую нас величину избыточного километрического ослабления

$$\alpha = \beta - \gamma = (N - N_0 - 20 \lg r/r_0)/r - \gamma.$$

Как видно, для определения α необходимо измерять уровни вблизи источника на определенном постоянном расстоянии r_0 от последнего и уровни на изменяющемся расстоянии r от источника.

При выборе метода и приборов для измерения уровней мы исходили из тех соображений, что измерения должны по возможности отображать реальные условия слушания. Поэтому мы отказались от применения самописцев, чтобы не иметь дела с мгновенными флюктуациями уровня, а применили шумомеры: объективный шумомер типа Ш-52 для измерения на расстоянии r_0, выбранном нами равным 5 *м*, и субъективный для измерений на больших расстояниях.

Объективный шумомер давал надежные устойчивые показания вблизи источника, где абсолютная величина уровня высока и на много превышает все возможные помехи, в том числе и ветровые.

Применение субъективного шумомера гораздо удобнее в тех случаях, когда уровень интенсивности звука, приходящего от удаленного источника, мал и сравним с уровнем помех. В наших опытах субъективный шумомер представлял собою комбинацию из объективного шумомера и местного (точечного) источника звука. Последний представлял собою головку рупорного громкоговорителя 25 ГРД и располагался на расстоянии 5 *см* от микрофона шумомера и на расстоянии 20 *м* от головы наблюдателя. Местный источник звука питался от звукового генератора ЗГ-2А через аттенюатор и кнопочный прерыватель.

При опытах наблюдатель уравнивал с помощью аттенюатора громкость сигнала от местного «точечного» источника звука с громкостью сигнала от удаленного, основного источника. Для облегчения уравнивания звучание основного источника периодически прерывалось. Звук местного источника также прерывался с тем, чтобы его импульсы попадали в паузы звука основного источника.

Естественно, что до уравнивания громкостей наблюдатель устанавливал частоту местного звукового генератора так, чтобы она совпадала с частотой звука от основного удаленного источника. Подлежащий измерению уровень интенсивности N звука, приходящего от основного, удаленного источника, уравненный по громкости с уровнем интенсивности

от местного источника, принимался равным

$$N = N_м - 20 \lg R/5,$$

где N — уровень звука от местного «точечного» источника на расстоянии 5 *см* от него, определяемый объективным шумомером, входящим в состав субъективного, R — расстояние в сантиметрах от этого источника до головы наблюдателя, выбранное нами равным 2000 *см*. При указанном расстоянии

$$N = N_м - 20 \lg 2000/5 = N_м - 52.$$

Другими словами, отсчеты объективного шумомера $N_м$ получались на 52 *дб* выше уровня интенсивности звука от основного, удаленного источника. Поэтому на показания объективного шумомера, измерявшего столь высокие уровни, помехи практически не влияли.

Что касается до точности уравнивания громкостей, то произведенные проверки показали, что результирующая погрешность измерения уровня наблюдателем при некоторой его тренировке не превышает 1—2 *дб*.

Измерение уровня осуществлялось на высоте 1,5 — 1,7 *м* над землей, что соответствует обычным условиям слушания. Само собой разумеется, что в силу этого в определяемую величину избыточного ослабления входит не только затухание в воздухе, но и дополнительное поглощение, обусловливаемое покровом и рельефом земной поверхности. Это обстоятельство, однако, мы считаем преимуществом использованного метода измерения, так как учет влияния характера покрова и рельефа земной поверхности на ослабление звука представляет большой практический интерес.

Примененный нами при опытах основной источник звука состоял из 4 рупорных громокоговорителей 400 ГРД-3, смонтированных на автоприцепе, где кроме них находился усилитель с выходной мощностью 1800 *вт*, звуковой генератор и тому подобное и питавшая аппаратуру автономная электростанция. Последняя обеспечивала возможность работы на трассах, где отсутствовала электросеть. Вся установка позволяла получать на расстоянии 5 *м* от устий рупоров звуковые давления 600—1000 *бар* в диапазоне частот 300—2000 *гц*.

Данные о метеорологических факторах (температуре, влажности, скорости ветра, градиентах температуры и скорости ветра) представлялись нам метеостанцией геофизической обсерватории им. Воейкова и дополнительно определялись комплектом аппаратуры, содержавшим: метеорологический термометр и универсальный прибор для измерения скорости ветра, влажности и градиента температуры, располагавшийся на воздушном змее, что позволяло определить метеофакторы не только на земле, но и на высотах до 250 *м*.

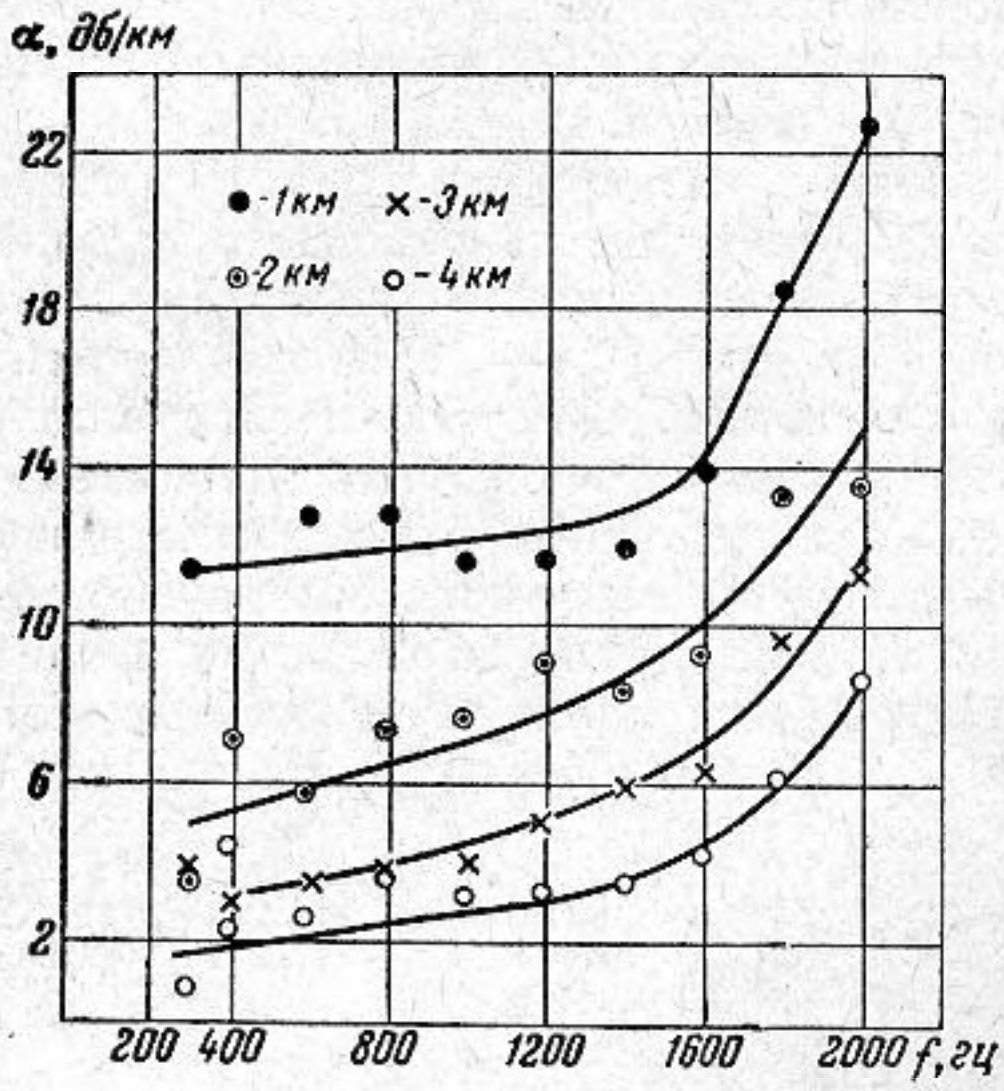
Трассы, на которых производились измерения, можно кратко охарактеризовать следующим образом. Трасса 1 представляла собою прямое шоссе. Местность по обе стороны шоссе была покрыта редким кустарником высотой 1,5 — 2 *м*. Трасса 3 представляла собой поле, покрытое редким кустарником. На отдельных участках трасса пересекала густой лес. Профиль местности по этой трассе — резко холмистый. По трассе 5 звук распространялся вдоль прямой открытой дороги в лесу. Профиль местности — равнинный с редкими незначительными возвышенностями. По трассе 7 местность представляла собой открытое поле и лишь на протяжении 1,5 *км* (в середине трассы) была покрыта высоким лесом. Профиль местности был слабо пересеченный; трасса проходила вдоль прямой дороги. Местность по трассе 8 представляла собой поле, покрытое очень редким кустарником; профиль местности резко пересеченный. По трассе 9 местность представляла собою водное пространство (озеро). Источник звука располагался на поляне, примыкающей к лесу на расстоянии 150 *м* от берега озера, а точка приема — на противоположном

берегу озера на расстоянии 3,2 *км*. По трассе 10 вся местность была покрыта очень густым сосновым лесом при высоте деревьев больше 6 *м*.

Перед началом измерений, на основе результатов метеорологических наблюдений, устанавливалось отсутствие или наличие акустической тени. Критерием наличия ее является выполнение неравенства

$$-\frac{\cos\varphi_0}{c}\left(\frac{c}{2.273}\,\frac{dt^0}{dz}+\frac{dv}{dz}\cos\alpha\right)>0,$$

где φ_0 — угол, составленный с горизонталью лучом, выходящим из источника и уже не отражающимся от земли (т. е. касающимися земли) dt^0/dz — градиент температуры на высоте z, dv/dz— градиент скорости ветра на высоте z, α — угол между направлением распространения звука и направлением ветра, c — скорость звука.



Фиг. 1

Оказалось, что акустическая тень имела место при 37,5% зимних наблюдений, 23,5% летних, 34% осенних и 31% весенних наблюдений. Из всех наблюдавшихся случаев появления акустической тени 73% приходилось на дневное время, 27% — на ночное.

Обращает на себя внимание тот факт, что вообще акустическая тень может наблюдаться довольно часто. Она наблюдается чаще зимой и несколько реже летом. Днем акустическая тень наблюдается чаще, чем ночью.

Если при обработке результатов наблюдений при исследовании распространения звука в атмосфере не учитывать явления акустической тени, то находимые величины ослабления могут оказаться сильно преувеличенными. Действительно, как показал Гутин [2], звуковая энергия от источника проникает в зону тени дифракционным путем; однако величина этой энергии столь мала, что эквивалентное затухание получается весьма большим. Поэтому при обработке наших экспериментальных данных все случаи, когда было установлено наличие акустической тени, обрабатывались отдельно.

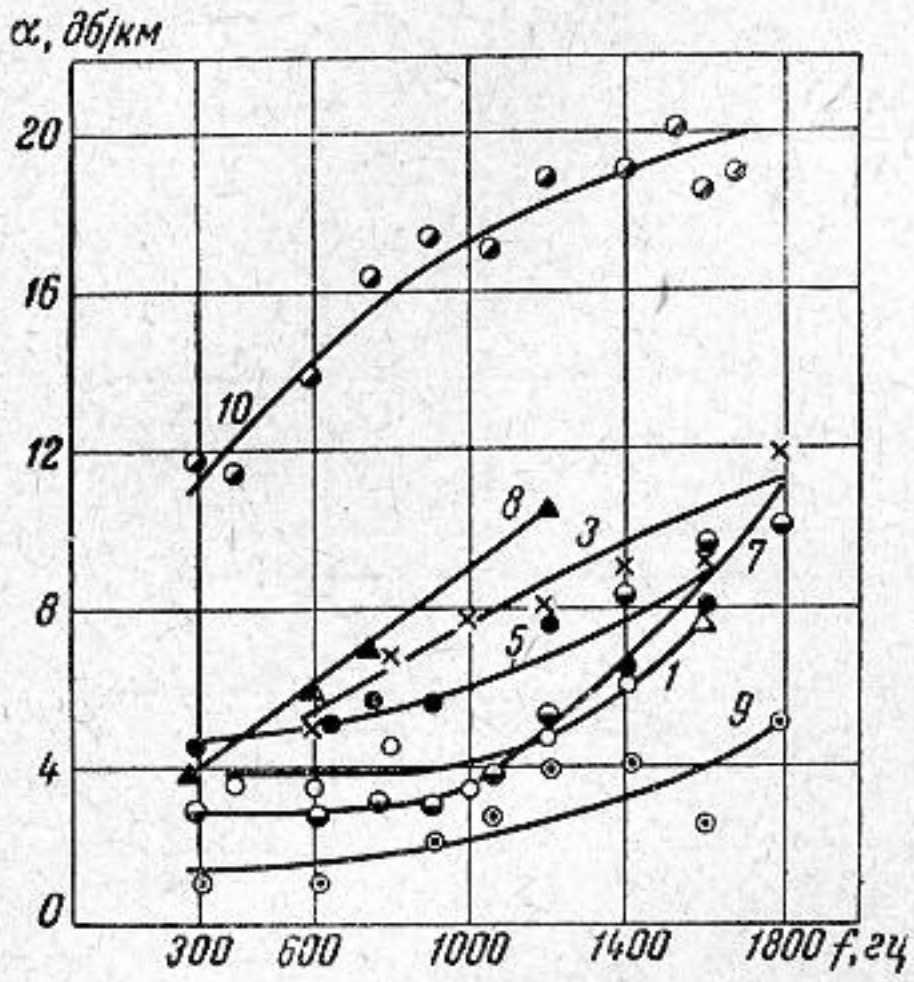
Полученные нами результаты приведены ниже в виде графиков, представляющих зависимость усредненной величины избыточного ослабления от частоты. Эти зависимости имеют достаточно регулярный характер, хотя данные отдельных измерений иногда довольно сильно отклонялись от усредненных величин.

На фиг. 1 даны частотные зависимости километрического избыточного ослабления для разных расстояний при отсутствии акустической тени. Легко видеть, что избыточное ослабление изменяется с расстоянием существенно нелинейно. Если по данным графиков фиг. 1 построить кривые полного избыточного ослабления для разных частот в функции расстояния, то оказывается, что для частот около 1600 *гц* полное избыточное ослабление возрастает только до расстояния в 2 *км*, а дальше остается почти неизменным. Для бо́льших частот полное ослабление продолжает увеличиваться с расстоянием, по крайней мере в обследованном нами интервале расстояний до 5 *км*.

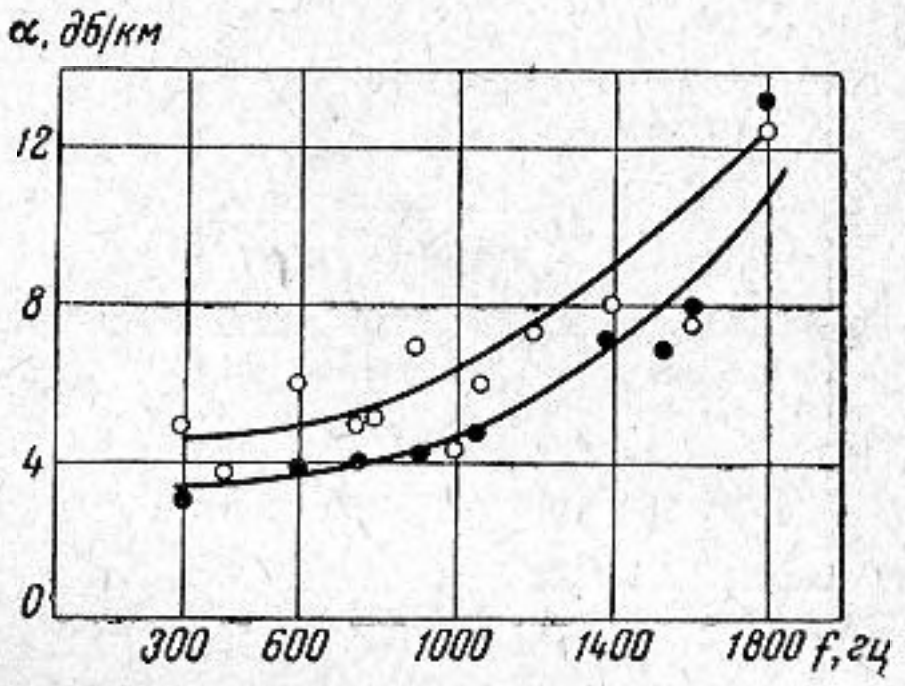
Частотные зависимости избыточного ослабления для различных трасс приведены на фиг. 2. Цифры на фигуре показывают номера трасс, относя-

щиеся к определенным кривым. На фиг. 3 приведены частотные зависимости избыточного ослабления на основании дневных измерений (верхняя кривая) и ночных (нижняя кривая) измерений; на фиг. 4 даны такие же зависимости для измерений проведенных летом (*1*), весной (*2*), осенью (*3*) и зимой (*4*). Из этих фигур видно, что избыточное ослабление больше днем, чем ночью, и больше летом, чем зимой.

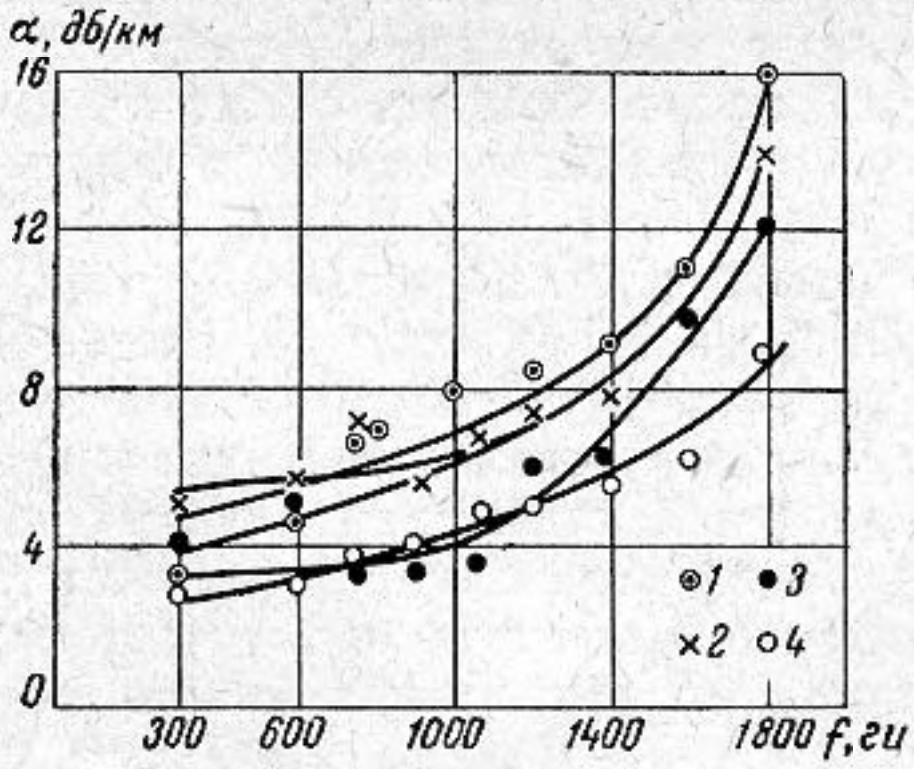
Что касается до избыточного ослабления при наличии акустической тени (на фиг. 5, по нашим данным — кривая *1*), то здесь обращает на себя внимание как большая величина избыточного ослабления, так и ее резко выраженная зависимость от частоты. Последнее хорошо согласуется, по крайней мере качественно, с теорией дифракционного проникновения энергии в зону акустической тени, развитой Гутиным [2].



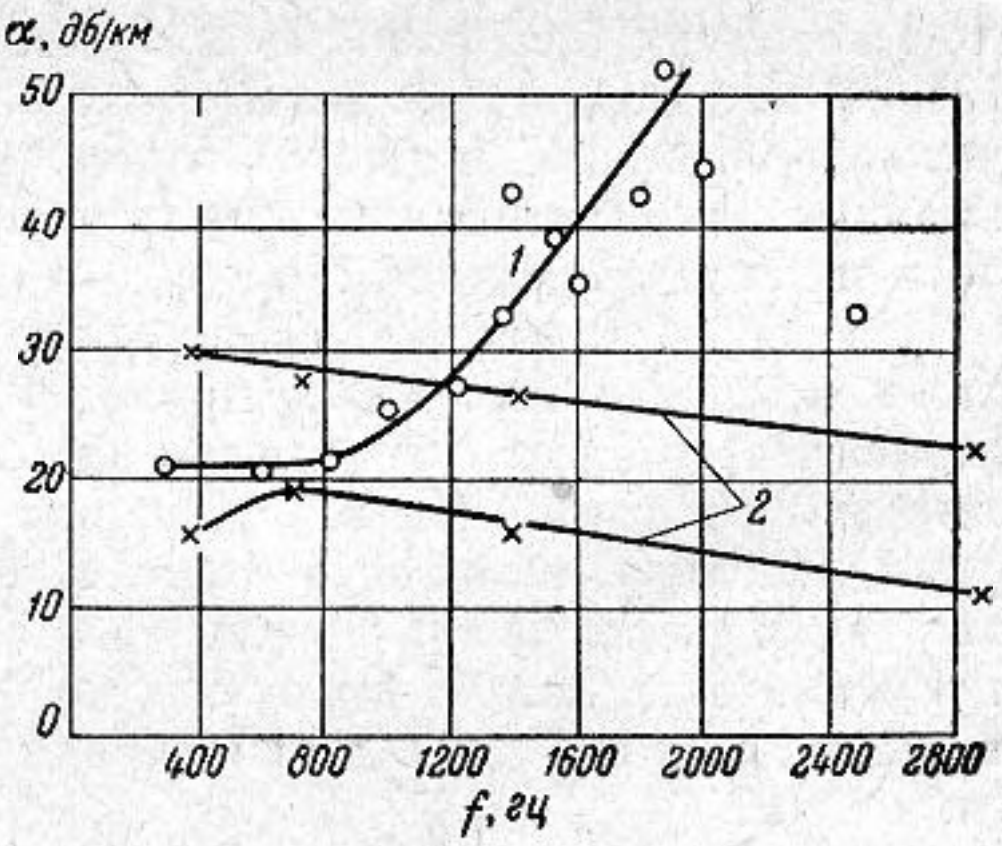
Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4



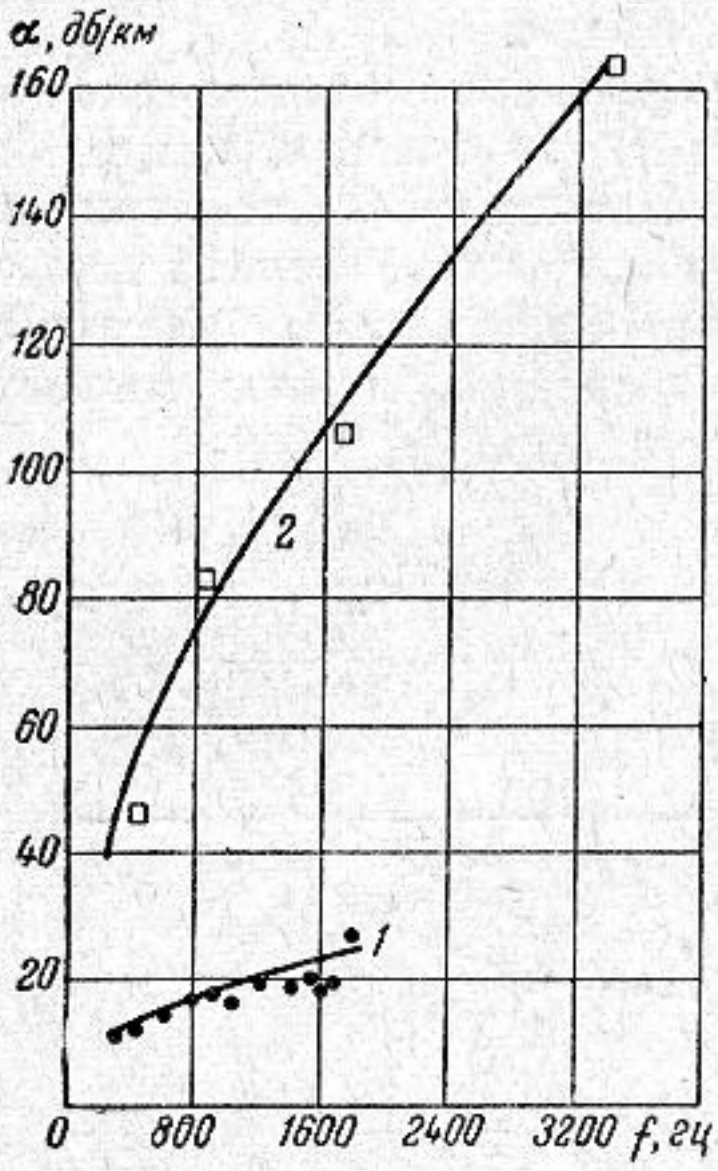
Фиг. 5

Как легко видеть из всех приводимых графиков, всегда имеет место явно выраженная зависимость избыточного ослабления от частоты; особенно резко эта зависимость проявляется на частотах выше 1000 *гц*. Это неоднократно наблюдалось нами и качественно в процессе наших экспериментов при «зондировании» атмосферы последовательностью тональных сигналов различной частоты в тех случаях ухудшения акустической погоды, когда не менялась величина молекулярного затухания (т. е. не менялась температура и влажность воздуха). Во всех этих случаях прежде всего «пропадали» более высокочастотные сигналы.

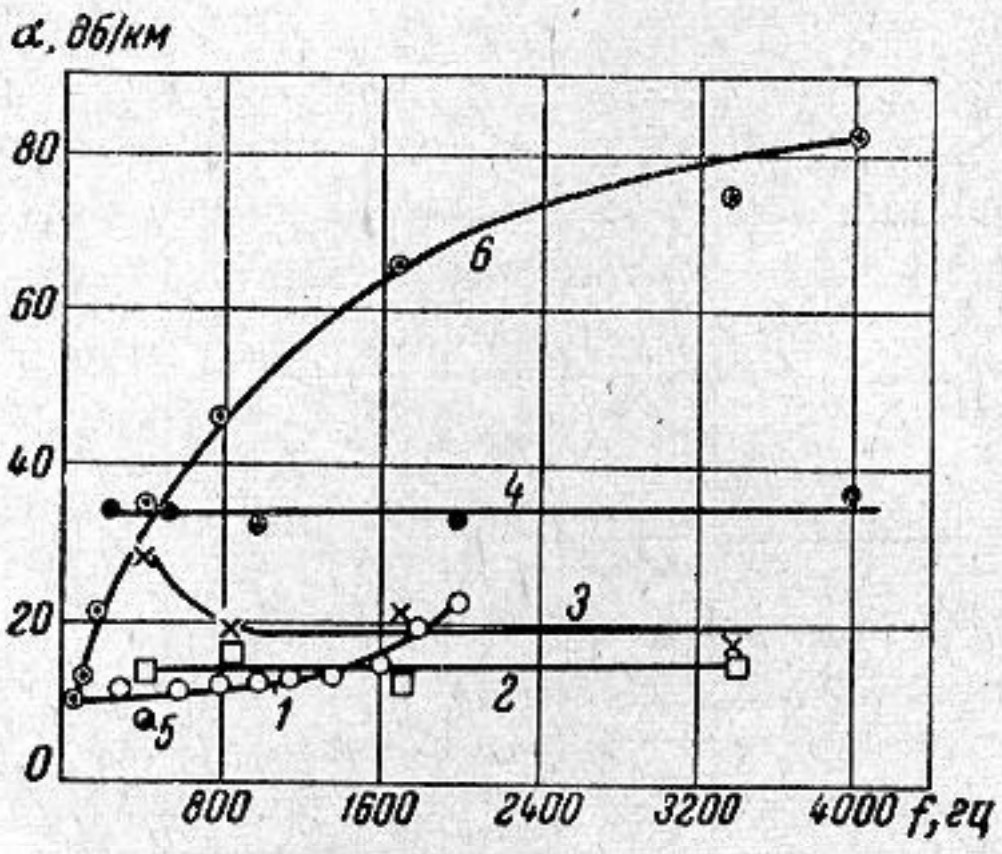
В целях проверки влияния скорости и направления ветра на избыточное ослабление мы исследовали зависимость усредненной величины

избыточного ослабления от $v\cos\alpha$ и $\cos\alpha$ и не нашли какой-либо корреляции избыточного ослабления с этими величинами.

Остановимся теперь на том, насколько полученные нами результаты согласуются с результатами опытов других исследований. На фиг. 6 сопоставлены данные об избыточном ослаблении при распространении звука через лес: по нашим измерениям—кривая *1* и по Винеру и Кисту [3] — кривая *2*. Возможно, что такое сопоставление не вполне правомерно потому, что, быть может, мы работали при наличии леса меньшей гу-



Фиг. 6



Фиг. 7

стоты, чем Винер и Кист. Однако нам представляется невероятным, чтобы источник, развивающий на частоте 1000 *гц* уровень интенсивности 136 *дб* на расстоянии 5 *м*, давал бы на расстоянии 1 *км* уровень 0 *дб* (величина 136 *дб* составляется из ослабления в 46 *дб* за счет закона обратных квадратов и 90 *дб* избыточного ослабления по данным Винера и Киста). По крайней мере, нам таких результатов при работе через леса не приходилось наблюдать никогда.

На фиг. 7 приведено сопоставление наших данных (кривая *1*) с данными Винера и Киста [3] (кривая *2*), Ингарда [4] (кривая *3*), Зига [4] (кривая *4*), Барона [5] (точка *5*) и Хайхерста [6] (кривая *6*). Наши данные для расстояния 1 *км* довольно хорошо согласуются с данными Барона, Ингарда, а также Винера и Киста (за исключением случая прохождения через лес). Данные Хайхерста представляются нам сильно преувеличенными. Независимость избыточного затухания от частоты, видная из фиг. 7 для данных ряда авторов, противоречит нашим наблюдениям.

При наличии акустической тени это противоречит и выводам теории. В этих случаях нами совершенно несомненно наблюдались весьма большие абсолютные величины избыточного ослабления (50 *дб* и больше), что существенно превышает предельную величину 30 *дб*, указываемую Винером и Кистом (на фиг. 5 данным Винера и Киста отвечают кривые *2*).

Винер и Кист считают, что начиная с некоторого расстояния полная величина избыточного ослабления нарастает на 3 *дб* с каждым удвоением расстояния. Однако для исследованного нами диапазона расстояний это правило явилось бы по существу не обоснованной экстраполяцией некоторых экспериментальных данных, полученных для меньших расстояний.

Очень важным фактом, по нашему мнению, является установление нелинейной зависимости избыточного ослабления от расстояния, что наблюдали мы и другие исследователи.

Как видно, результаты экспериментов разных исследователей не во всем согласуются, а подчас и противоречивы. Представляется, что это

в значительной степени объясняется сильной изменчивостью параметров реальной атмосферы, а также различиями рельефа и покрова местности. Очевидно, для получения более точных результатов требуется накопление большего статистического материала, что, конечно, чрезвычайно желательно.

ЛИТЕРАТУРА

1. H. O. K n e s e r. Die akustischen Relaxionserscheinungen. Zs.f.t. Phys., 1938, 19, 12, 486—492.
2. Л. Я. Г у т и н. О распространении звука в свободной атмосфере. Ж. эксп. и теор. физ., 1935, 5, 9, 857—863.
3. W i e n e r, K e a s t. Experimental study of the propagation of sound over the ground. J. Acoust. Soc. America, 1959, **31**, 6, 724—733.
4. S i e g. Über die Schallausbreitung im Freien und ihre Abhängigkeit von den Wetterbedingungen. Elekt. Nach. Techn., 1940, **17**, 9, 193—208.
5. B a r o n. Propagation du son dans l'atmosphère et audibilité des signaux avertisseurs dans le bruit ambiant. Ann. télécom. acoust., 1954, 66, 256—274.
6. H a g h u r s t. The attenuation of sound propagated over the ground. Acoustica, 1953, 3, 4, 227—232.

Государственный союзный н.-и. институт
радиовещательного приема и акустики
им. А. С. Попова
Ленинград

Поступила в редакцию
15 ноября 1961 г.