

Лекция 31 Объективные и субъективные характеристики звука. Распространение звука. Отражение и поглощение звуковых волн. Ультразвук и его применение. Инфразвук, основные понятия.

Л-1: 11.7-11.12; Л-2: с.404-409

Изменение температуры воздуха и скорости ветра с высотой делают атмосферу неоднородной средой с переменной скоростью звука. Это приводит к искривлению (*рефракции*) звуковых лучей. Поскольку скорость распространения звука зависит от температуры, в разных слоях атмосферы, температура слоев которых различна, звук будет иметь разную скорость. В среде с переменным показателем преломления звуковые волны будут распространяться по кривым линиям. При этом, как показывают многочисленные опыты, луч загибается всегда так, что расстояние от точки к точке волна проходит за самое короткое время. Данное положение носит название *принципа Ферма*. Иначе говоря, распространяющаяся в неоднородной среде волна изменяет направление так, чтобы продлить свой путь в среде с большей скоростью распространения и сократить его в слоях, где скорость распространения меньше.

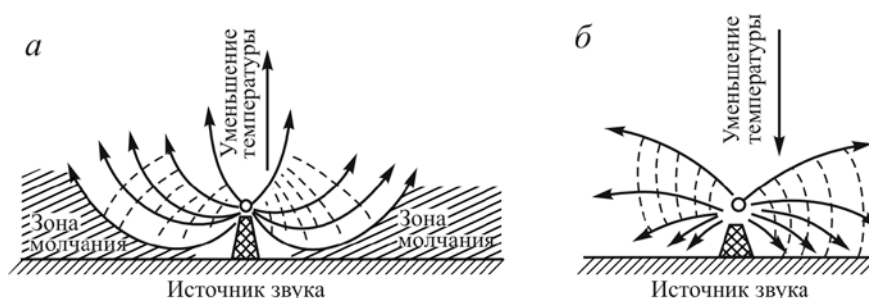


Рис. 31.1

Если температура понижается с высотой, что обычно бывает днем, то звуковые лучи при этом загибаются вверх (рис. 31.1, а). В результате на некотором небольшом расстоянии от источника звук перестает быть слышимым. Если же с высотой температура увеличивается (*температурная*

инверсия), звуковые лучи загибаются вниз (рис. 31.1, б) и звук доходит до более отдаленных точек земной поверхности. Этим объясняется тот часто наблюдаемый факт, что ночью звук слышен на бóльшем расстоянии, чем днем. При большой температурной инверсии звуковые лучи, испытав значительное преломление, возвращаются к поверхности земли, отражаются от нее и снова поднимаются вверх (рис. 31.2). Таких отражений может быть несколько, звуковая энергия в этом случае концентрируется в некотором



Рис. 31.2



Рис. 31.3

слое, который играет роль звукового канала. Дальность распространения при таких условиях значительно увеличивается. Особенно заметно это в тихую ночь над рекой, благодаря слабому поглощению звуковых волн водной поверхностью. Поэтому вдоль реки можно слышать даже слабые звуки на расстоянии нескольких километров.

Если температура воздуха с высотой изменяется незначительно и ветра нет, то звук от источника распространяется, не испытывая заметного преломления. Так, в зимние морозные дни далеко слышен гудок поезда, скрип саней, стук топора в лесу и т. п.

При наличии ветра его скорость и скорость звуковой волны складываются. Разный характер загибания звуковых лучей в этом случае (рис. 31.3) объясняет тот факт, что по ветру звук слышен дальше, чем против ветра.

Многие источники звука (взрыв, шум двигателя, ветер и т.п.) излучают волны низких частот: инфразвуковые и близкие к ним. Такие низкочастотные звуки поглощаются слабо и в результате могут распространяться на сравнительно большие расстояния. Это можно объяснить следующим образом.

Рассмотрим звуковую волну, которая возникла в результате взрыва. Идущие вдоль поверхности земли звуки сильно поглощаются и рассеива-

ются благодаря неровностям земной поверхности, а также неоднородностям температуры и скорости ветра. Поэтому звук даже от мощного взрыва можно слышать на расстояниях, не превышающих 20–30 км. Однако этот звук становится снова слышимым на еще бóльших расстояниях.

Объясняется это тем, что на высоте 50–70 км располагаются слои атмосферного озона с температурой 50–70 °С. Звук, который идет под некоторым углом к земной поверхности, достигнув этого слоя, описывает дугу и снова возвращается на землю. Поэтому после зоны молчания на расстоянии около 150–200 км и более можно снова услышать звук взрыва. Зон слышимости может быть несколько, поскольку звуковые волны, которые пришли сверху, могут многократно отражаться от земной поверхности, подниматься вверх и снова возвращаться к ней.

При ядерных взрывах возникают ударные волны огромной силы, которые в результате затухания на некотором расстоянии переходят в мощные инфразвуковые волны, распространяющиеся на большие расстояния. Эти волны можно зарегистрировать инфразвуковыми приемниками. Таким образом, может быть обнаружен ядерный взрыв, совершенный в воздухе или воде на большом расстоянии от места наблюдения.

Существенная особенность подводных звуков – их малое затухание, в результате чего под водой они могут распространяться на гораздо бóльшие расстояния, чем в воздухе. Так, в области слышимых звуков дальность распространения под водой звуков средней интенсивности достигает 15–20 км, а в области ультразвука – 3–5 км.

Для описания физических параметров звука существуют два подхода, которые опираются на две системы физических величин, между которыми существует определенная связь.

Первый подход основан на исследовании так называемых *объективных* (не зависящих от восприятия звука человеком) *характеристик* при помощи физических приборов. Объективные характеристики – это частота

и интенсивность звука. Второй подход базируется на восприятии звука слуховым аппаратом человека – ухом (*субъективные характеристики*).

При рассмотрении энергии волнового движения была получена формула $\varphi = 1/2\rho A^2 \omega^2 v$, определяющая количество энергии, которая переносится за одну секунду через площадку в один квадратный метр, размещенную перпендикулярно направлению распространения волны. Эту величину в акустике называют *интенсивностью звука* или *силой звука*

$$I = \frac{1}{2}\rho A^2 \omega^2 v.$$

Интенсивность звука связана с давлением звукового излучения (звуковым давлением). Давление звукового излучения представляет среднее по времени избыточное давление на препятствие, помещенное в звуковое поле. Это давление определяется импульсом, который передается волной в единицу времени на единицу площади препятствия.

Установим связь между интенсивностью звука и давлением звукового излучения при помощи математических соотношений. Пусть плоская монохроматическая звуковая волна задана уравнением

$$\chi = A \sin \omega \left(t - \frac{y}{v} \right).$$

Скорость, с которой смещаются частицы в звуковой волне, или акустическая скорость

$$u = \frac{d\chi}{dt} = A\omega \cos \omega \left(t - \frac{y}{v} \right).$$

Закон изменения давления в пространстве и времени:

$$\Delta p = \rho v A \omega \cos \omega \left(t - \frac{y}{v} \right),$$

т.е. звуковое давление зависит как от характеристик среды (плотности ρ и скорости v), так и от характеристик волны (амплитуды A и циклической частоты ω).

Множитель

$$p_0 = \rho v A \omega$$

называют *амплитудой звукового давления*.

Произведение

$$\rho v = R_a$$

называется *акустическим сопротивлением* среды. Измеряется R_a в *акустических омах* и зависит только от свойств среды.

Выражению для амплитуды звукового давления можно придать вид

$$p_0 = R_a A \omega .$$

Используя понятия амплитуды звукового давления и акустического сопротивления, получим следующее выражение для интенсивности звука:

$$I = \frac{1}{2} \frac{p_0^2}{R_a} .$$

Таким образом, интенсивность звука прямо пропорциональна квадрату амплитуды звукового давления и обратно пропорциональна акустическому сопротивлению. Интенсивность звука в СИ измеряется в Вт/м².

Сравнивая формулу для звукового давления и формулу для акустической скорости частиц, получаем: $\Delta p = \rho v u = R_a u$.

Таким образом, звуковое давление равно произведению акустического сопротивления и акустической скорости частиц этой среды. Изменение звукового давления и акустической скорости частиц происходит в одинаковых фазах.

Интенсивность звука обычно измеряется косвенным методом. Вначале измеряют звуковое давление и акустическую скорость частиц среды, а затем находят интенсивность.

Среди механических приборов, которые служат для этой цели, наиболее часто используется *диск Релея*, представляющий собой легкий диск, подвешенный на тонкой кварцевой нити и снабженный зеркальцем для измерения его поворота вокруг вертикальной оси. Этот диск помещается в звуковое поле под углом 45° к направлению распространения волны



Рис. 31.4

(рис. 31.4). Поворот диска Релея в звуковой волне вызывается действием аэродинамических сил при обтекании потоком, которые стремятся поставить его перпендикулярно скорости потока. Момент аэродинамических сил, действующих на диск, направлен все время в

одну и ту же сторону и поэтому в среднем за период отличается от нуля. Этот момент пропорционален квадрату амплитуды скорости частиц в звуковой волне. С помощью светового луча, падающего на зеркальце, можно найти угол поворота диска и вычислить пропорциональный ему крутильный момент.

Диск Релея позволяет выполнять абсолютные измерения амплитуд в звуковой волне. Однако он обладает сравнительно малой чувствительностью и легко поддается воздействию побочных потоков воздуха. Главным образом этот диск используется для градуировки микрофонов, с помощью которых измеряется давление и интенсивность звука не только в воздухе и других газах, но и в воде.

Другая объективная характеристика звуковой волны – частота – определяет спектральный состав звука. Линейчатые спектры имеют периодические колебания, сплошные – колебания, которые не имеют периода. К первым относятся музыкальные звуки, ко вторым – разного рода шумы.

По субъективному восприятию звуки отличаются *высотой*, *тембром* и *громкостью*. Высота звука определяется частотой колебаний: чем больше частота колебаний, тем выше звук. Слуховой аппарат человека наиболее чувствителен к звукам средней частоты (около 1 кГц). Однако чистые звуковые тона, которым соответствуют монохроматические звуковые волны, можно возбудить только в специальных условиях. Реальные звуки представляют собой суперпозицию упругих волн разной частоты.

Субъективная оценка спектрального состава звука определяет его тембр, или окраску. Тембр зависит от набора частот и отношений амплитуд составляющих колебаний. Один и тот же музыкальный тон, взятый на раз-

ных инструментах, будет иметь одинаковую основную частоту, но разный тембр. Для оценки тембра звука имеет значение как количество, так и размещение составляющих частот в акустическом спектре. Тембровая окраска звука определяется распределением интенсивностей обертонов. Чем более сложный спектр, тем более богат тембр звука.

Гласные звуки человеческой речи представляют собой колебания, близкие к периодическим, и содержат кроме основного тона гармонические обертоны. Согласные же звуки представляют собой колебания, далекие от периодических. Спектр этих звуков довольно сложен.

Громкость является субъективной оценкой интенсивности звука. Для того чтобы вызвать звуковое ощущение, волна должна обладать некоторой минимальной интенсивностью, которая называется *порогом слышимости*. Порог слышимости для разных людей несколько разный и зависит от частоты звука. Самый низкий порог слышимости по интенсивности равен примерно 10^{-16} Вт/см², а по звуковому давлению $\sim 10^{-5}$ Па в пределах 1–5 кГц. Максимальная интенсивность, превышение которой вызывает в ухе болевые ощущения, называется *порогом болевого ощущения*. Максимальное его значение составляет приблизительно 10^{-4} Вт/см². Порог болевого ощущения меньше зависит от частоты. Совокупность точек, соответствующих порогу слышимости, и точек, соответствующих порогу болевого ощущения, создает на диаграмме две кривые (I, ν), которые ограничивают область, называемую областью слышимости (рис. 31.5). Разговорная речь использует только небольшую ее часть (на рис. 31.5 эта область заштрихована).

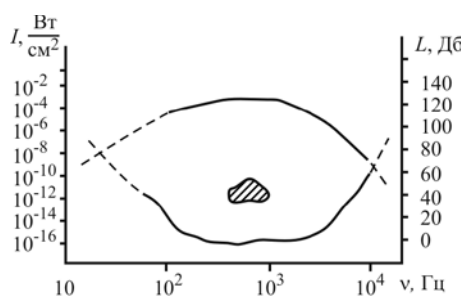


Рис. 31.5

Из диаграммы видно, что интенсивности звуков, воспринимаемые человеческим ухом, отличаются в 10^{12} раз.

Как показывает опыт, субъективно оцениваемая громкость увеличивается намного медленней, чем интенсивность звуковых волн. При

возрастании интенсивности в геометрической прогрессии громкость увеличивается приблизительно линейно. На этой основе громкость L выражают в логарифмической шкале:

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0},$$

где $I_0 = 10^{-16}$ Вт/см² – интенсивность, условно принятая за исходную. Эта интенсивность близка к порогу слышимости человеческого уха при частоте звука 1 кГц. Громкость в соответствии с формулой при этом равна нулю (звук не воспринимается). Единица измерения громкости в данной шкале – *децибел* (дБ).

При помощи этой формулы можно определить уменьшение интенсивности волны при ее распространении. Так, например, уменьшение громкости на 60 дБ означает, что интенсивность уменьшилась в миллион раз.

Возможность оценивать направление распространения звуковых волн слуховым аппаратом человека обусловлена главным образом одновременным воздействием звуковой волны на оба уха. Ощущение направления звуковых волн возникает благодаря способности мозга человека учитывать разность фаз колебаний, достигающих ушей. Влияние сдвига фаз волны, которая действует на оба уха, называется *бинауральным эффектом*.

Длины волн звукового диапазона лежат в пределах от нескольких сантиметров до десятков метров. Волна частотой 20 кГц имеет в воздухе длину примерно 16 мм, а частотой 20 Гц – 16 м. Поэтому при распространении звуковых волн мы сталкиваемся с довольно сложной картиной. Если при распространении звуковая волна встречает преграду, то в случае, когда ее длина значительно меньше преграды, будет наблюдаться явление отражения волн. Если же размеры преграды намного меньше длины волны, будет наблюдаться явление дифракции: волны огибают преграду, заходя в область геометрической тени. В тех случаях, когда размеры преграды сравнимы с длиной волны, законы распространения звуковой волны становятся более сложными, потому что одновременно имеет место и некоторое

отражение, и дифракция. Отметим, что преградой, от которой отражаются волны, является любая граница, на которой изменяется акустическое сопротивление среды ρv . Например, звук может отразиться от более нагретого слоя воздуха, границы тумана, облака и т.п.

При падении звуковой волны, распространяющейся в воздухе, на границу раздела двух сред часть ее энергии переходит в энергию отраженной волны, а часть проникает в другую среду. В этой среде начинают распространяться звуковые волны. Энергия отраженной волны зависит от того, насколько ли отличаются акустические сопротивления рассматриваемых сред, на границу которых падают звуковые волны.

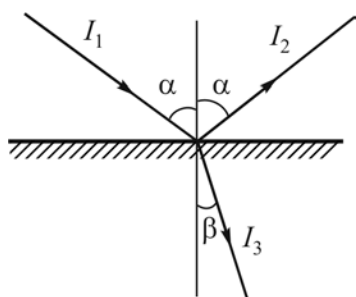


Рис. 31.6

Рассмотрим случай, когда на границу раздела двух сред падает звуковая волна, интенсивность которой I_1 , под углом α к нормали (рис. 31.6). Волна интенсивностью I_2 отразится от границы раздела под тем же углом α . Одновременно в другой среде будет распространяться волна интенсивностью I_3 . Прони-

кая в другую среду, где скорость звука не такая, как в первой среде, волна отклоняется от своего первоначального направления. Смена направления распространения звуковых волн при переходе из одной среды в другую легко объяснить, пользуясь принципом Гюйгенса. Отношение $\beta = I_3/I_1$ называется *коэффициентом проникновения*, который зависит от отношения акустических сопротивлений сред.

Интенсивность волны, отраженной от границы раздела двух сред, определяется соотношением: $I_2 = I_1 - I_3$. Отношение $\rho = I_2/I_1$ называют *коэффициентом отражения*. Очевидна следующая связь между коэффициентами ρ и β : $\rho = 1 - \beta$.

Поглощение звука – уменьшение интенсивности распространяющейся звуковой волны с расстоянием, обусловленное внутренним трением и теплопроводностью. В результате происходит необратимый переход части

звуковой энергии в тепловую. У плоской звуковой волны такое ослабление звука на расстоянии x происходит по экспоненциальному закону: $I/I_0 = e^{-\alpha x}$, где I/I_0 – отношение интенсивностей до прохождения расстояния x и после этого.

Величина α носит название *коэффициента поглощения*. При $x = 1/\alpha$ получим $e^{-\alpha x} = e^{-1} = 1/e$ и уменьшение интенсивности $I/I_0 = 1/e$. Таким образом, коэффициент поглощения – величина, обратная расстоянию x , на котором амплитуда волны при ее распространении уменьшается в e раз. Поглощение звука зависит от свойств среды, в которой распространяется звук, и от его частоты.

Коэффициент поглощения обратно пропорционален квадрату длины волны или прямо пропорционален квадрату частоты звука. Звуки высоких тонов поглощаются в атмосфере значительно сильнее, чем низких. Поэтому звуки, представляющие собой суперпозицию волн разной частоты, резкие вблизи источника возникновения, по мере удаления от него становятся более глухими и низкими, потому что высокие тона, которым соответствуют большие частоты, быстро затухают.

Применение ультразвука в науке и технике необычайно разнообразно. Назовем лишь два основных направления его практического использования.

Первое направление объединяет методы исследования разных явлений во многих отраслях физики, техники, биологии и т.д. Эти методы основаны на использовании ультразвука малой интенсивности. Второе направление объединяет методы воздействия на вещество, поскольку ультразвук большой интенсивности оказывает влияние на технологические процессы, способен изменять физические характеристики материалов.

Ультразвук имеет преимущество перед звуковыми волнами, благодаря малой длине волны. Так, например, в морской воде при частоте 500 Гц длина волны звука равна 3 м, а при частоте 500 кГц – всего 0,3 см. Малая

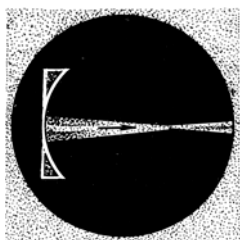


Рис. 31.7

длина волны может значительно повышать разрешающую способность ультразвуковых методов, а также получать направленное излучение большой интенсивности в малом объеме.

Сравнительно малая длина ультразвуковых волн дает возможность для изучения их распространения в ряде случаев методами геометрической акустики. Отсюда следуют такие свойства ультразвука, как возможность геометрического отражения и преломления, а также фокусировки. На этих свойствах базируются исследования микроскопических неоднородностей среды. На рис. 31.7 изображена картина фокусировки ультразвукового пучка в воде плосковогнутой линзой из пластмассы.

Большую роль ультразвук играет в гидроакустике, поскольку он является единственным видом упругих волн, которые хорошо распространяются в морской воде. Затухание ультразвука в воде приблизительно в 10^3 раз меньше, чем в воздухе.

Вибратор с плоской поверхностью излучает плоские ультразвуковые волны, которые распространяются параллельными прямолинейными пучками. Направленные ультразвуковые пучки нашли широкое применение для целей *локации* (нахождение предметов и определение расстояния до них) в воде.

Рельеф морского дна измеряется *эхолотами*. Приборы, которые позволяют выявить преграды в воде (подводную лодку, айсберг, косяк рыб и т.д.), называют *гидролокаторами*. В современных гидроакустических приборах вместо кварцевых излучателей и приемников используются магнетострикционные и сегнетоэлектрические. Явление отражения ультразвука на границе разных сред было использовано при создании приборов для определения размеров изделий (ультразвуковые толщиномеры), измерения уровня жидкости в больших емкостях, где нельзя выполнить прямые замеры. Ультразвуковые приборы, которые служат для выявления дефектов

(раковин, трещин и др.) в разных изделиях из твердых материалов, называются *ультразвуковыми дефектоскопами*.

Современные дефектоскопы позволяют контролировать металлические детали размерами более 10 м и обнаруживать дефекты внутри них размерами около миллиметра.

Ультразвуковые методы широко применяются в качестве инструмента исследования структуры вещества. Изменения скорости распространения и параметров затухания ультразвука зависят от внешних условий (давления, температуры и др.). На этом основываются промышленные методы контроля наличия примесей, исследования свойств кристаллических материалов, измерения упругих и вязких характеристик веществ и т.д.

В последнее время ультразвук широко используется для диагностики, терапевтического и хирургического лечения в разных отраслях медицины. Способность ультразвука без значительного поглощения проникать в мягкие ткани организма и отражаться от неоднородностей используются для исследования внутренних органов. Так, с помощью ультразвука находят опухоли мягких тканей, чего нельзя сделать другими методами. Микромассаж тканей и локальный их нагрев под действием ультразвука используется в медицине для терапевтических целей. Ультразвуковые хирургические инструменты значительно уменьшают болевые ощущения и потери крови.

При паянии и лужении металлов (алюминия, титана, молибдена) ультразвук разрушает окисные корки на поверхности детали и облегчает эти процессы. С использованием ультразвука можно лудить, а затем паять керамику, стекло и другие неметаллические материалы.

Дегазацию жидкостей выполняют при сравнительно небольших интенсивностях ультразвука. Мелкие газовые пузырьки в жидкости сближаются, слипаются и всплывают на поверхность. Дегазации подвергаются расплавы оптических стекол, жидкие алюминиевые сплавы и другие жидкости. Ультразвуковую обработку используют при обогащении (флотации) руд. В этом случае газовые пузырьки оседают на частицах минералов и всплы-

вают вместе с ними. При облучении ультразвуком улучшается процесс кристаллизации расплавов металлов. Весьма эффективным является использование ультразвука для обработки таких хрупких материалов, как стекло, фарфор, керамика. На материал воздействуют миниатюрным долотом, соединенным с излучателем ультразвука, причем профиль долота должен соответствовать желаемому профилю изделия.

Ультразвуковым способом можно получить отверстия любого, самого сложного контура. Сварка металлов и других материалов происходит в твердой фазе (без расплавления). Металл нагревается до 200–600 °С в результате действия сил трения между инструментом и металлом. Колебания инструмента содействуют очистке поверхностей, поэтому шов получается хорошего качества. Этим способом соединяют в отдельных местах или сплошным швом листовые металлы, сплавы, пластмассы. Ультразвуковая обработка твердых веществ используется также при резке металлов, стекла, керамики, алмаза и т.п., при обработке металлов давлением (волочении, штамповке, прессовании и др.).

Для образования эмульсий обычно используют ультразвуковые аппараты в виде свистков и сирен. Подготовка суспензий в основном проводится в аппаратах с магнитострикционными преобразователями.

Существуют и многие другие отрасли применения ультразвука.

Многие животные имеют способность воспринимать и излучать волны ультразвуковой частоты. Метод ультразвуковой локации позволяет летучим мышам хорошо ориентироваться при полете в темноте. Периодически излучая импульсы ультразвуковой частоты, а затем воспринимая с помощью органа слуха отраженные сигналы, летучая мышь с высокой точностью определяет расстояние до окружающих предметов. Дельфины излучают и воспринимают ультразвуки частотой до 70 кГц. Многие мелкие насекомые на лету создают ультразвуковые волны. Опытным путем обнаружено, что птицы болезненно реагируют на ультразвуковые частоты выше

25 кГц. Этот эффект используется для отпугивания чаек от водоемов с питьевой водой.

Инфразвук (от лат. *infra* – ниже, под) – медленные изменения давления в воздухе, которые не воспринимаются на слух. От обычных звуков инфразвук отличается малой частотой (меньшей 16 Гц) и большой длиной волны. Нижний предел инфразвукового диапазона не выражен. Практический интерес могут иметь колебания порядка десятых и даже сотых долей герца, т.е. с периодом в десяток секунд. Природные источники инфразвука – это метеорологические, сейсмические и вулканические явления. Инфразвуки возникают в результате флуктуаций давления в атмосфере и водной среде; источниками их являются ветер, морские волны (в том числе приливные), водопады, землетрясения, обвалы, извержения вулканов, газовые разряды, температурное раскалывание ледового покрова и т.д. Инфразвуки издают многие обитатели мирового океана. Источниками инфразвука, связанными с деятельностью человека, являются взрывы, ударные волны от сверхзвуковых самолетов, удары копров, выстрелы пушек, излучение реактивных двигателей и др. Инфразвуковые составляющие есть в шуме двигателей и технического оборудования, винтов кораблей и т.п.

Скорость распространения инфразвука небольшой силы такая же, как и скорость распространения обычного звука. Звуки же взрывов, в которых давления вблизи места взрыва могут достигать многих атмосфер, распространяются в воздухе со скоростями, в несколько раз превышающими скорость обычного звука; в меньшей степени наблюдается увеличение скорости сильных инфразвуков в воде.

Характерное свойство инфразвука – весьма малое (по сравнению со слышимыми звуками) поглощение в воздухе. Из-за большой длины волны на инфразвуковых частотах невелико и рассеивание звука в природной среде, более значительное рассеивание создают только очень крупные объекты: холмы, горы, высокие строения и др. В результате инфразвуки распространяются на очень большие расстояния, постепенно очищаясь от

слышимых звуков, которые поглощаются быстрее. Известно, что звуки извержения вулканов, атомных взрывов могут много раз огибать земной шар, сейсмические волны способны пронизывать всю толщу Земли.

В результате большой дальности распространения инфразвуки имеют важное практическое применение в звукометрии при определении мест мощных взрывов. Распространение инфразвуков на большие расстояния в море дает возможность предсказать стихийное бедствие – цунами. Если море волнуется, дующий вдоль его поверхности ветер вызывает возникновение в воздухе колебаний с длиной волны, которая соответствует расстоянию между гребнями водяных волн. Этому и соответствуют инфразвуковые частоты. Распространяясь в воздухе со скоростью, превышающей скорость распространения ветра и штормовых волн в море, инфразвуковые волны, достигая берега, служат предупреждением о приближающемся шторме. Звуки взрывов, которые содержат большое количество инфразвуковых частот, используются для исследования верхних слоев атмосферы, свойств водной среды.

Последние исследования показали, что инфразвуки с высоким уровнем громкости (120 дБ и более) оказывают вредное влияние на организм человека и животных. Очень вредным являются инфразвуковые вибрации, поскольку при их воздействии могут возникнуть опасные резонансные явления в отдельных органах.

Обычные методы для регистрации инфразвука непригодны. Инфразвук очень низкой частоты можно обнаружить с помощью чувствительных барометров. Для регистрации инфразвука сравнительно высоких частот, как правило, используют специальные низкочастотные микрофоны, приемники электрохимического, термисторного и оптического типов.