

11. АКУСТИКА

11.1. Волновая природа звука

Упругие волны частотой от 16 Гц до 20 кГц, распространяющиеся в воздухе, достигнув человеческого уха, вызывают специфическое ощущение звука. В соответствии с этим упругие волны в газах, твердых телах и жидкостях, которые имеют частоту, лежащую в указанных пределах, называют *звуковыми волнами* или просто *звуком*. Волны с частотой, меньшей 16 Гц, называются *инфразвуком*, а с частотой, большей 20 кГц, — *ультразвуком*. Самые высокочастотные упругие волны в диапазоне 10^9 – 10^{13} Гц относятся к *гиперзвуку*.

Область инфразвуковых частот снизу практически не ограничена. В природе встречаются инфразвуковые колебания с частотой в сотые и тысячные доли герца. Частотный диапазон гиперзвуковых волн сверху имеет принципиальное ограничение, обусловленное атомным и молекулярным строением сред, в которых они распространяются.

Область физики, изучающая способы возбуждения звуковых волн, их распространение и взаимодействие со средой, называется *акустикой*.

Источниками звука могут быть любые явления, вызывающие колебания упругой среды. В создаваемых для этой цели излучателях звука используются колебания твердых тел (например, струны, деки музыкальных инструментов, диффузоры громкоговорителей и мембраны телефонов) или ограниченных объектов воздушной либо водной среды (органные трубы, свистки). Колебания могут возбуждаться ударом (струны рояля, колокола), поддерживаться потоком газа (свистки), создаваться путем преобразования колебаний электрического тока в механические (электроакустические преобразователи). В природе звук возбуждается при обтекании твердых тел потоком воздуха за счет образования и отрыва вихрей, например при обдувании ветром деревьев, гребней морских волн и т.д. Звуки низких и инфразвуковых частот возникают при взрывах, обвалах, землетрясениях и т.п. Сложной колебательной системой является голосовой аппарат человека и животных.

Известный опыт со звонком, помещенным под колпак воздушного колокола, из которого выкачивают воздух, доказывает, что для распространения звука необходима упругая среда.

Рассмотрим объем газа, в который помещен источник колебаний звуковой частоты. Представим, что под действием этого источника в каком-нибудь месте произошло сжатие газа, т.е. в это место перешли частицы из других мест. Тогда в области уплотнения давление газа увеличивается, в результате чего возникает сила, направленная в сторону меньших уплотнений, куда и начнут переходить частицы с места первоначального уплотнения. При этом там, где было сжатие, наступит разрежение, и наоборот, в соседних местах, где сначала возникло разрежение, произойдет сжатие.

При прохождении звуковой волны образующиеся в среде сгущения и разрежения создают добавочные изменения давления по отношению к среднему внешнему (статическому) давлению. Эти изменения давления и обуславливают избыточное давление в среде.

Следует отличать избыточное давление в среде от *давления звукового излучения*, которое часто называют просто *звуковым давлением* (см. § 11.7).

Таким образом, плотность и давление газа будут колебаться, причем эти колебания не связаны с определенным местом в газе, а передаются от одного места к соседнему.

Как видим, возникновение звуковых волн возможно, если среда оказывает упругое противодействие деформации. Твердые тела оказывают противодействие как деформации продольного сжатия и растяжения, так и деформации сдвига, поэтому в твердых телах могут распространяться и продольные, и поперечные звуковые волны. Жидкости и газы не оказывают в обычных условиях противодействия сдвигу, поэтому в них существуют только продольные звуковые волны.

Распространение звуковых волн определяется как строением источника звука, так и свойствами окружающей среды. Если размеры источника звука малы по сравнению с длиной излучаемой им звуковой волны λ , то такой источник можно считать *точечным*. Если он находится в однородной изотропной среде, то от него распространяются сферические волны. Если размеры источника велики по сравнению с длиной волны, то форма распространяющейся волны более сложная; ее можно определить с помощью принципа Гюйгенса.

С давних времен звук служит средством связи и сигнализации. Изучение всех его характеристик позволяет разработать более точные системы передачи информации, повысить дальность систем сигнализации, улучшить качество звучания

музыкальных инструментов. Звуковые волны являются практически единственным видом сигналов, распространяющихся в водной среде, где они служат средством подводной связи, используются в навигации, локации. Это обусловлено тем обстоятельством, что никакие виды электромагнитных волн не распространяются в воде (из-за ее электропроводности) на сколько-нибудь значительные расстояния. Низкочастотный звук является инструментом исследования земной коры. Практическое применение ультразвука создало целую отрасль современной техники – ультразвуковую. Ультразвук используется как для контрольно-измерительных целей, так и для активного воздействия на вещество. Высокочастотные звуковые волны и особенно гиперзвук служат важнейшим средством исследования в физике твердого тела.

11.2. Источники звука

Любое тело, совершающее колебания звуковой частоты и помещенное в упругую среду, становится источником звуковых волн. В зависимости от механизма возникновения и поддержания колебаний все источники звука можно подразделить на три вида.

1. Источники, излучающие звук в результате собственных колебаний. Такие источники представляют собой колебательные системы с распределенными параметрами. Колебания могут происходить только при условии внешнего воздействия за счет первоначально накопленной энергии (в результате начального смещения или начальной скорости). Получаемые от них звуковые волны являются синусоидальными или близкими к ним. Очевидно, что характер этих колебаний будет определяться главным образом собственными параметрами колебательной системы – массой и упругостью. К источникам этого вида принадлежат: *камертоны*, различные *пластины*, *стержни*, *колокола*, *струны*, возбуждаемые ударом (рояль) или щипком (гитара, балалайка, арфа).

В качестве примера рассмотрим струну, закрепленную на обоих концах. *Струнами* называют упругие твердые тела, поперечные размеры которых очень малы по сравнению с их длиной. Если струне сообщить импульс силы, перпендикулярный к ее длине, то он будет распространяться вдоль струны. Вследствие отражения от мест закрепления в струне уста-

новятся стоячие волны с узлами в этих местах. В результате на длине струны укладывается целое число полувольт:

$$l = (n+1) \frac{\lambda}{2} \quad (n=0, 1, 2, 3, \dots).$$

Отсюда

$$\lambda = \frac{2l}{n+1}, \text{ или } \nu = (n+1) \frac{\nu}{2l}, \quad (11.1)$$

где ν — скорость звука в струне.

Таким образом, свободные колебания струны возникают в виде стоячих волн с собственными частотами, определяемыми формулой (11.1). Частота $\nu_0 = \nu/2l$ называется *основной частотой*, а соответствующий ей тон звука, излучаемого струной, — *основным тоном*. Звуки, соответствующие более высоким частотам, называются *обертонами*. Нужно отметить, что при колебаниях струны одновременно устанавливается ряд стоячих волн. Таким образом, струна одновременно излучает и основную частоту, и обертоны. При этом интенсивность обертонов значительно меньше интенсивности колебаний основной частоты. Изменяя длину струны, можно изменить и частоту основного тона и обертонов.

В камертоне и пластинах устанавливаются волны только основного тона, потому что их конструкция делает возникновение обертонов невозможным.

2. Источники звука, в которых колебательная система совершает автоколебания за счет пополнения энергии извне. Это *органные трубы, свистки, смычковые и духовые инструменты*.

Рассмотрим механизм возникновения звука в органной трубе (рис. 11.1, а). Фотографирование струи воздуха с взвешенными в нем частицами показало, что в щели происходит сложный процесс периодического образования вихрей, схематически изображенный на рис. 11.1, б. Возникающие периодические вихри проходят друг за другом то слева, то справа от клина. На столб воздуха в трубе действуют периодические толчки, в результате чего в нем возникают колебания. Эти колебания

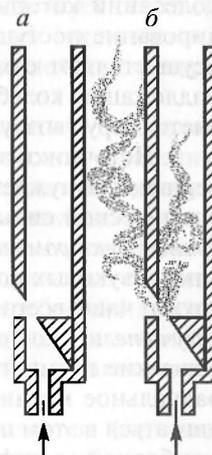


Рис. 11.1

в свою очередь оказывают обратное воздействие на процесс вихреобразования около щели. Колебания столба воздуха в трубе приобретают частоту, близкую к одной из его собственных частот, в зависимости от скорости продувания воздуха через щель.

Частота и характер колебаний столба воздуха в органной трубе определяются свойствами колебательной системы, регулирование поступления энергии на поддержание колебаний выполняется самой системой. Именно поэтому колебания столба воздуха в органной трубе представляют собой типичный случай автоколебаний.

Довольно совершенный тип автоколебательной системы представляет собой голосовой орган человека. Рассмотрим его работу. Верхний конец дыхательного горла, играющий роль воздушной трубки, закрыт эластичными голосовыми связками. Выталкиваемый из легких воздух проходит через щель, которую образуют связки, и приводит их в колебание. Воздушный поток прерывается с частотой собственных колебаний связок, в результате чего возникает звук. Изменяя натяжение голосовых связок, мы изменяем частоту их собственных колебаний, а значит, частоту издаваемого нами звука. На частоту издаваемых звуков оказывает влияние также положение языка, зубов и губ. Здесь очень выразительно выделяются основные элементы автоколебательной системы. Колебательной системой являются голосовые связки, частотой и характером колебаний которых определяют характеристики звука. Регулирование поступления энергии на поддержание колебаний осуществляют сами голосовые связки, т.е. механизмы, принадлежащие колебательной системе. Источником энергии является струя воздуха, выталкиваемая легкими человека.

3. Источники звука, в которых колебательные системы совершают вынужденные колебания под действием внешней периодической силы. Это *динамические громкоговорители, мембраны электромагнитных телефонов и сирены*. Источниками ультразвуковых колебаний, относящихся также к этому виду, служат чаще всего *пьезоэлектрические и магнитострикционные излучатели*. Наиболее распространенные в наше время динамические громкоговорители состоят из магнита, создающего радиальное магнитное поле, и токовой катушки, способной двигаться в этом поле и связанной с большой конусообразной мембраной — диффузором. При пропускании тока звуковой частоты катушка под действием силы Ампера приходит в вы-

нужденные колебания, вызывая движение диффузора, создающего в окружающей среде упругие волны звуковой частоты.

Аналогичное устройство имеют и электромагнитные телефоны, состоящие из постоянного магнита, размещенного вблизи стальной мембраны. На магнит намотана катушка, по которой проходит ток звуковой частоты. Мембрана является двухмерной колебательной системой, которая обладает несколькими собственными частотами, зависящими от геометрии мембраны и способа ее закрепления. При возбуждении она приходит в поперечные колебания и в ней устанавливаются стоячие волны. Мембраны находят широкое применение для возбуждения звуковых волн, если нет особых требований к направленности излучения. В сирене поток воздуха периодически прерывается диском, имеющим ряд отверстий.

Рассмотрим принцип действия пьезоэлектрических и магнитострикционных излучателей ультразвуковых волн. Если из некоторых кристаллов (кварца, турмалина, сегнетовой соли и др.) определенным образом вырезать пластинку, то при сжатии или растяжении такой пластинки на ее поверхности появляются электрические заряды: на одной стороне – положительные, на другой – отрицательные. Говорят, что такой кристалл обладает *пьезоэлектрическими* (от греч. *piezo* – давить, сжимать) *свойствами*. Возникновение зарядов на поверхности кристаллической пластинки при давлении на нее называется *прямым пьезоэлектрическим эффектом*. Он используется в приемниках ультразвуковых и звуковых колебаний. Существует также *обратный пьезоэлектрический эффект*, который заключается в том, что размеры пластинки изменяются под действием переменного электрического поля.

Для получения звука используют обратный пьезоэлектрический эффект. Если к пьезоэлектрической пластинке приложить с помощью металлических обкладок переменное электрическое напряжение, то пластинка начнет колебаться. Колебания пластинки становятся особенно интенсивными, если частота изменений электрического напряжения совпадает с частотой собственных механических колебаний пластинки. В результате резонанса амплитуда вынужденных колебаний пластинки достигает максимума и в ней устанавливаются продольные стоячие волны.

Собственная частота пластинки определяется формулой $\nu = v/2l$, где v – скорость распространения продольных упругих волн в материале пластинки (для кварца $v = 5600$ м/с). Как

видим, предел получения высоких частот основного тона пластинки ограничен ее толщиной l . Для повышения частоты ультразвуковых волн используются так называемые *гармоники*, соответствующие обертонам.

Нужно отметить, что пьезопластики создают волны сравнительно небольшой интенсивности. Для получения ультразвука значительной интенсивности используют магнито-стрикционные излучатели. *Магнито-стрикция* заключается в том, что ферромагнитные вещества (железо, никель, некоторые сплавы) при действии на них магнитного поля слегка деформируются. Поместив ферромагнитный стержень в переменное магнитное поле (например, внутрь катушки, по которой проходит переменный ток), можно возбудить его механические колебания, которые будут особенно интенсивными при резонансе.

11.3. Скорость звука

Скорость распространения волн в упругой среде не зависит от их частоты (см. § 10.3). Это в полной мере относится и к звуковым волнам.

Таким образом, звуковые волны разной длины и, значит, разной частоты распространяются в воздухе с одной и той же скоростью. Мы не могли бы получать удовольствие от музыки, если бы это было не так: сначала до нас доходили бы звуки одной частоты (одного тона), а затем другой. Лишь для многоатомных газов и жидкостей была обнаружена дисперсия при ультразвуковых частотах.

Рассмотрим вопрос о скорости распространения звука в газе. Скорость распространения продольного импульса волн в упругом стержне определяется формулой

$$v = \sqrt{E / \rho}. \quad (11.2)$$

Для деформируемого упругого стержня длиной l модуль Юнга

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\sigma}{\Delta l / l},$$

где σ — упругое напряжение в стержне; $\Delta l / l$ — относительное удлинение.

Для случая ограниченного объема газа напряжение σ следует заменить на дополнительное давление Δp , вызывающее сжатие газа. Допуская, что выделенный объем газа сжимается только вдоль своей длины при неизменном поперечном сечении, относительную линейную деформацию $\Delta l/l$ можно заменить относительной объемной деформацией $\Delta V/V$.

Таким образом, имеем:

$$E = \frac{\Delta p}{\Delta V/V}.$$

Считая изменения давления и объема бесконечно малыми, обозначим их dp и dV . Будем также считать, что давление газа зависит только от его объема V . В результате последнее соотношение примет вид

$$E = -V \frac{dp}{dV}. \quad (11.3)$$

Величина dp/dV зависит от характера процесса сжатия (либо расширения) газа. Как известно, при сжатии воздуха увеличивается давление и, значит, растет модуль упругости. Кроме того, воздух, как и любой газ, при сжатии нагревается, а при расширении охлаждается. Изменение температуры воздуха приводит к дополнительному изменению его упругости. При сжатии за счет увеличения температуры упругость возрастает, а при расширении — уменьшается.

Дополнительное изменение упругости воздуха при сжатии может возникнуть только в случае, если сжатие происходит так, что выделившаяся тепловая энергия не успеет рассеяться. Если процесс расширения осуществлять достаточно быстро, то возникшая разность температур не успеет выравняться. Процесс, при котором не происходит теплообмена с окружающей средой, называется *адиабатическим*.

Распространение продольных звуковых волн в газе представляет собой адиабатический процесс:

$$pV^\gamma = \text{const},$$

где $\gamma = c_p/c_v$ — отношение теплоемкости газа при постоянном давлении к теплоемкости при постоянном объеме — *коэффициент Пуассона*.

Дифференцируя уравнение адиабатического процесса, получаем:

$$V^\gamma dp + \gamma V^{\gamma-1} p dV = 0,$$

откуда

$$\frac{dp}{dV} = -\gamma \frac{p}{V}. \quad (11.4)$$

Подставим выражение (11.4) в формулу (11.3):

$$E = \gamma p. \quad (11.5)$$

После подстановки соотношения (11.5) в формулу (11.2) получим:

$$v = \sqrt{\gamma p / \rho}. \quad (11.6)$$

Подставив в формулу (11.6) вместо p его выражение, полученное из уравнения состояния идеального газа Клапейрона* – Менделеева** $pM = \rho RT$, где M – молярная масса; $\rho = m/V$ – плотность газа; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура, приходим к следующей формуле для скорости звука в газе:

$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}}.$$

Отсюда следует, что скорость звука в газе зависит от температуры и величин γ , M . На первый взгляд может показаться, что скорость звука в газе зависит от давления (см. формулу (11.6)). Однако это не так, потому что при изменении давления изменяется также и плотность. Экспериментально установлено, что в широком диапазоне изменения давлений скорость звука не зависит от давления. Только при очень высоких давлениях (≈ 100 атм) скорость звука увеличивается.

Скорость звука в газах увеличивается с повышением температуры. При комнатных температурах (около 20°C) скорость звука в воздухе растет приблизительно на $0,6$ м/с на градус. В жидкостях скорость звука, как правило, уменьшается с увеличением температуры. Исключением из этого правила

* Клапейрон Бенуа Поль Эмиль (1799–1864) – французский физик и инженер.

** Менделеев Дмитрий Иванович (1834–1907) – русский химик, разносторонний ученый, педагог.

является вода, в которой скорость звука увеличивается с повышением температуры и достигает максимума при 74 °С, а с дальнейшим повышением температуры — уменьшается. В упругих твердых телах кроме продольных волн могут распространяться поперечные и поверхностные звуковые волны. Скорость распространения этих волн значительно отличается от скорости распространения продольных волн.

Скорость звука в газах меньше, чем в жидкостях, а в жидкостях — меньше, чем в твердых телах. В качестве примера в табл. 11.1 приведены скорости звука для некоторых газов и жидкостей.

Таблица 11.1. Скорость звука в газах при температуре 0 °С и давлении 0,1 МПа и в жидкостях при температуре 20 °С

| Газ | v , м/с | Жидкость | v , м/с |
|----------|-----------|----------------|-----------|
| Азот | 334 | Бензин | 1160 |
| Водород | 1270 | Вода | 1462 |
| Воздух | 331 | Глицерин | 1923 |
| Гелий | 970 | Керосин | 1315 |
| Кислород | 317 | Ртуть | 1407 |
| Метан | 430 | Спирт этиловый | 1190 |

Измерение скорости звука используется для определения многих свойств веществ. Исследование малых изменений скорости звука является испытанным методом определения наличия примесей в жидкостях и газах. Изучение зависимости скорости звука от разных факторов в твердых телах позволяет исследовать зонную структуру полупроводников, строение металлов и т.п. Знание скорости распространения упругих волн необходимо в сейсмологии. Скорость звука имеет большое значение и в аэродинамике. При скорости движения тел, приближающейся к скорости звука, резко изменяется характер обтекания твердых тел потоком, возникают ударные волны и многочисленные явления, связанные с ними.

11.4. Распространение звука

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, то в разных слоях атмосферы, температура в 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.

Если температура понижается с высотой, что обычно бывает днем, то звуковые лучи при этом загибаются вверх (рис. 11.2, а). В результате на некотором небольшом расстоянии от источника звук перестает быть слышимым. Если же с высотой температура увеличивается (*температурная инверсия*), то звуковые лучи загибаются вниз (рис. 11.2, б) и звук доходит до более отдаленных точек земной поверхности. Этим объясняется тот часто наблюдаемый факт, что ночью звук слышен на большем расстоянии, чем днем. При большой температурной инверсии звуковые лучи, испытав значительное преломление, возвращаются к поверхности Земли, отражаются от нее и снова поднимаются вверх (рис. 11.3). Подобных отражений может быть несколько, звуковая энергия в этом случае концентрируется в некотором 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

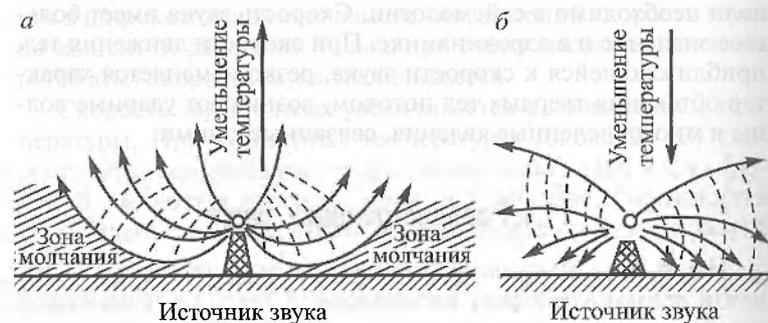


Рис. 11.2

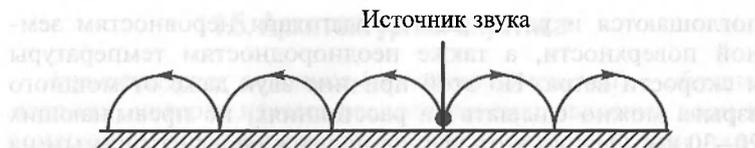


Рис. 11.3

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. 11.4) объясняет тот факт, что по ветру звук слышен дальше, чем против ветра.



Рис. 11.4

Движение воздуха в атмосфере всегда турбулентное, поэтому скорость и температура в каждой точке воздушного потока пульсируют по величине, а скорость, кроме того, — по направлению. Это приводит к возникновению в атмосфере мелких неоднородностей и рассеянию на них звуковой энергии, а значит, к значительному увеличению затухания звука.

Многие источники звука (взрыв, шум двигателя, ветер и т.п.) излучают волны низких частот: инфразвуковые и близкие к ним. Такие низкочастотные звуки поглощаются слабо, вследствие чего 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 рассеиваются благодаря неровностям земной поверхности, а также неоднородностям температуры и скорости ветра. По этой причине звук даже от мощного взрыва можно слышать на расстояниях, не превышающих 20–30 км. Однако этот звук становится снова слышимым на еще больших расстояниях. Объясняется это тем, что на высоте 50–70 км располагаются слои атмосферного озона с температурой 50–70 °С. Звук, распространяемый 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, пришедшие 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, осуществленный в воздухе или в воде на большом расстоянии от места наблюдения.

Существенная особенность подводных звуков — их малое затухание, в результате чего под водой они могут распространяться на гораздо большие 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.

Нужно отметить очень интересное явление — сверхдальнее распространение звуков под водой, обусловленное рефракцией звуковых волн. Это явление заключается в следующем. На некоторой глубине под поверхностью воды находится слой, в котором звук распространяется с наименьшей скоростью. Выше скорость звука увеличивается из-за повышения температуры, а ниже — в результате увеличения гидростатического давления. Этот слой представляет собой своеобразный подводный звуковой канал. Волна, отклонившаяся вверх или вниз от оси канала в результате рефракции, всегда стремится попасть в него снова. В данном слое даже звуки средней интенсивности могут быть зарегистрированы на расстояниях в сотни и тысячи километров.