

Звонящий лёд

Только раз в году и только на пальме...

Концовка старого анекдота.

Явление, о котором пойдет речь, можно наблюдать (слушать) везде, где на зиму замерзают водоемы со спокойной водой: пруды, озера. К сожалению, для его изучения в средней полосе России предоставляется всего несколько дней в году (3–4, а иногда и меньше). Звонящий лёд я впервые услышал в ноябре, когда проходил через плотину только что замерзшего Джамгаровского пруда на севере Москвы. Мальчишки развлекались, бросая в него камни с обочины. Их, по-видимому, забавляло звучание льда. Большинство камней упруго отскакивали, издавая при ударах серию звуков, но иногда камень пробивал лёд, и тогда характер звука менялся. Очевидно, лёд был достаточно тонким. В чем же особенность такого тонкого льда и чему посвящена статья?

Интересует нас короткий период времени, в течение которого на озерах и прудах вода покрывается тонким и одинаковым по толщине слоем льда. Этот период в Москве приходится обычно на начало или середину ноября. Температура воздуха постепенно опускается и в течение нескольких дней держится вблизи нуля по Цельсию. За это время вода в пруду остывает и уже готова к замерзанию. Первые же заморозки с температурой воздуха $-5...10$ °C при отсутствии сильного ветра приводят к появлению льда. Толщина льда меняется достаточно медленно, но за неделю вырастает настолько, что уже никаких интересных звуков не слышно. Мне удалось наблюдать (слушать) интересное звучание при толщине льда от 1 до 3 см. Если толщина более 5 см, считайте, что время в текущем году уже упущено.

Предположим, мы оказались на берегу замерзающего озера в нужный период времени. Нам следует запастись значительным количеством камней массой от 0,1 до 0,5 кг и выбрать открытое место на берегу напротив широкого участка водоема. Если бросить камень под углом к горизонту так, чтобы он, поднявшись вверх метров на 8–10 и пролетев по горизонтали метров 15–20, упал на лёд, под которым есть слой воды толщиной около метра, то после падения камня вы услышите «музыкальный» звук, который быстро и плавно меняет свою высоту. Начинается звучание с высоких частот, а заканчивается заметно более низкими. На слух продолжительность звучания составляет 0,3–0,5 с и напоминает звучание, издаваемое гитарной струной, после однократного щипка медиатором. Чтобы и высота звучания гитарной струны менялась со временем так же, как у льда, нужно после удара медиатором вести пальцем вдоль звучащей струны так, чтобы её свободный и звучащий участок увеличивал свою длину (есть такой приём в арсенале гитаристов).

Дело в том, что человеческое ухо (вместе с мозгом) представляет собой очень качественный анализатор звука. Изменение высоты звука на 1–2% замечается на слух безо всяких проблем. Заинтересовавшись звоном льда, я записал на магнитофон эти звуки. Временная развертка записанного сигнала показала именно то, что слышало ухо: частота быстро менялась за время звучания, а огибающая амплитуды колебаний по форме напоминала колокол. Средняя частота колебаний вблизи середины интересующего нас интервала времени с максимальной амплитудой колебаний составляла около 800 Гц. Начиналось звучание с высокой частоты (~1000 Гц), а заканчивалось низкой (~500 Гц). Эти величины были получены при толщине льда около 1,5 см (в момент записи сигнала на магнитофон я еще не осознал, что нужно было измерить и толщину льда, поэтому здесь сказано «около 1,5 см»).



Итак, все «герои» расставлены, и первая картина спектакля сыграна. Остался, как в детективе, вопрос: а почему же все-таки лёд звучит именно так, а не иначе?

Известно, что ударное возбуждение колебательной системы вызывает в ней широкий по частоте спектр колебаний, из которых система самостоятельно выделяет области частот вблизи своих собственных резонансных. Колебания в выделенной резонансной области приобретают значительную амплитуду, а колебания частотами вне резонансной области быстро затухают и «уходят в шумы». Удар камня по прочной поверхности льда возбуждает звуковые волны во льду и в воде под ним. Скорость звуковых волн в твердом теле (лед) значительно больше, чем в жидкой воде. Лёд выступает в роли поршня, который распределяет «точечное» давление камня на лёд на большую площадь поверхности воды подо льдом. Масса льда значительно меньше массы воды, находящейся между льдом и дном пруда,

поэтому на резонансных частотах столба воды наличие сверху льда практически не сказывается. При скорости звука в воде $u = 1500$ м/с и глубине водоема около $h = 1$ м резонансные колебания водяного столба соответствуют тому, что на длине (глубине в данном случае) h укладывается целое число полуволн. Если это число равно 1, то получится частота колебаний примерно $f = \frac{u}{2h} = 750$ Гц (уже «тепло», т.к. оцененная величина достаточно близка к измеренной

средней частоте колебаний записанных звуков). Удар вызывает одновременное появление большого количества (спектра) колебаний с разными частотами, но с одинаковыми начальными фазами. В начальный момент все колебания складываются в одной фазе и создают резкий фронт. Этот фронт собственно и описывает удар. Затем колебания распространяются вдоль поверхности льда и за счет дисперсии приобретают разные фазы. Сигнал при этом расширяется во времени, и временная развертка частоты как раз соответствует наличию дисперсии. На некоторых записях заметны периодические увеличения и уменьшения амплитуды сигнала: биения.

Резонансные колебания столба воды под местом удара раскачивают волны на поверхности воды, покрытой льдом, на значительном удалении от места удара. Вдоль поверхности воды волны распространяются с разными (из-за дисперсии) скоростями. Различие скоростей связано с наличием на поверхности упругой «пленки» льда. Известно, что скорости волн на поверхности воды зависят от глубины водоема и от поверхностного натяжения воды. Соответствующая формула приводится, например, в школьном справочнике по элементарной физике *Н.И. Кошкина и М.Г. Ширкевича*:

$$V = \sqrt{\frac{2\pi\sigma}{\lambda\rho} + g\lambda} \quad , \quad (1)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения, g – ускорение свободного падения, λ – длина волны, ρ – плотность воды. Коэффициент поверхностного натяжения жидкой воды – малая величина ($\sim 0,07$ Н/м), поэтому длина волны капиллярных волн на поверхности жидкой воды, для которых поверхностное натяжение играет определяющую роль, обычно меньше 2 см. В рассматриваемом нами случае поверхность воды покрыта тонким, прочным и упругим, льдом, что соответствует значительному увеличению коэффициента поверхностного натяжения:

$$\sigma = Ed.$$

Здесь E – модуль Юнга упругой пленки льда, d – ее толщина. В рассматриваемом случае второе слагаемое под корнем не играет существенной роли, поэтому упрощенная формула выглядит так:

$$v = \sqrt{\frac{2\pi\sigma}{\lambda\rho}}.$$

Если перейти от длины волны к частоте колебаний, то при основной частоте, близкой к $f = \frac{u}{2h}$, между частотой колебаний и скоростью распространения волн вдоль поверхности имеет место связь:

$$v = \sqrt{\frac{2\pi Ed}{\frac{v}{f}\rho}}$$

или

$$v = \sqrt{\frac{2\pi Ed}{\frac{2hv}{u}\rho}}.$$

После преобразований получаем:

$$v^3 = 2\pi \frac{Edf}{\rho} \quad \text{или} \quad v = \sqrt[3]{\pi \frac{EdU}{h\rho}}.$$

Модуль Юнга льда $E \approx 2 \cdot 10^{10}$ Па. Отсюда скорость распространения волн вдоль поверхности воды, покрытой льдом толщиной 1,5 см, равна примерно 1,1 км/с. Из приведенных формул видно, что скорость распространения поверхностных волн зависит от частоты. Частоты группируются вблизи резонансного значения $\frac{u}{2h}$.

Полученная скорость меньше скорости звука в воде. Это и является главным условием для того, чтобы лед звенел. С увеличением толщины льда (параметра d) от 1,5 до 5 см скорость поверхностной волны увеличивается в 1,5 раза и сравнивается со скоростью звука в воде: эффект звенящего льда пропадает.

При частоте колебаний, близкой к $\frac{u}{2h} = 750$ Гц, длина волны составляет 1,5 м. Второе слагаемое под корнем в формуле (1), которым мы пренебрегли при расчете скорости волны, примерно в 10^8 раз меньше первого. Следовательно, использование упрощенной формулы вполне оправдано.

Осталось объяснить, почему же мы слышим достаточно долгий звук, а не короткий ударный. Вот здесь нужно вспомнить, что мы выбрали для эксперимента открытое место на берегу большого пруда. Поверхностная волна убегает от нас на большое расстояние со скоростью, которая значительно больше скорости звука в воздухе. Волновое движение для каждой точки поверхности пруда соответствует вертикальным смещениям поверхности воды, покрытой льдом. «Тряска» поверхности вызывает появление колебаний давления воздуха вблизи поверхности льда – это и есть те самые звуковые волны, которые мы слышим. Бросая камни на лёд, мы находимся недалеко от «фокуса» – источника звука. Разбегающиеся со скоростью v по поверхности воды волны создают звуковые волны, которые в свою очередь возвращаются к этому самому «фокусу», усиливая друг друга, т.к. имеют одинаковые фазовые сдвиги. Скорость звука в воздухе $c_{\text{возд}}$ в несколько раз меньше v и меньше u . Зная время звучания (0,3–0,5 с), можно оценить диапазон расстояний, с которых к нам приходят звуки по воздуху. Это расстояние как раз сравнимо с размерами (шириной) того уголка пруда, на котором проводились эксперименты (100–200 м).

Приведенные рассуждения следует считать попыткой разобраться в явлении, а вовсе не готовой и правильной теорией. Автор имеет право ошибаться, а в данном случае, может быть, и реализовал свое право.

Заинтересовавшиеся этим явлением читатели смогут его исследовать, но, по-видимому, возможность такая представится им не раньше чем через полгода. Правда, есть способ обмануть природу. Для этого достаточно в нужное время оказаться в средних широтах в южном полушарии. Там зима начнется через 2–3 месяца, значит, ждать появления звенящего льда осталось совсем недолго!

**С. ВАРЛАМОВ,
МИОО, СУНЦ МГУ, г. Москва**