



Ako veľryby telefonujú – fyzikálna akustika netradične II.

Juraj Slabeycius¹, Pedagogická fakulta Katolíckej univerzity v Ružomberku

Článok přetiskujeme ze sborníku Národního festivalu fyziky 2011 **Tvorivý učitel fyziky IV**, <http://sfs.sav.sk/smolenice/index.htm>, který se konal ve Smolenicích 12. – 15. 4. 2011. Ve sborníku se originál článku nachází na stranách 205–215². V tomto čísle časopisu Školská fyzika naleznete dokončení článku, první část vyšla v čísle předchozím.

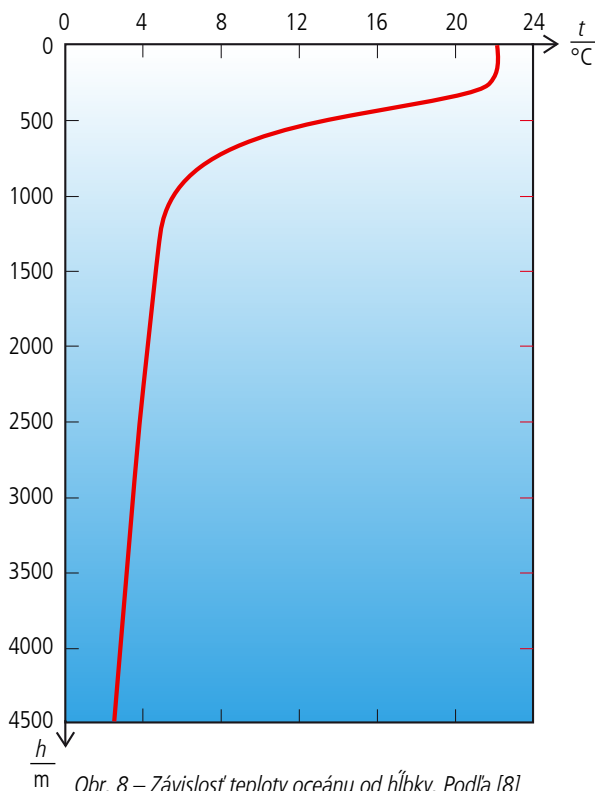
7 Akustika morí a oceánov

Venujme sa teraz šíreniu zvuku v kvapalnom prostredí. Je to predmetom skúmania akustiky morí a oceánov, často nazývanej aj hydroakustikou. Zvuk sa šíri v kvapaline rýchlosťou

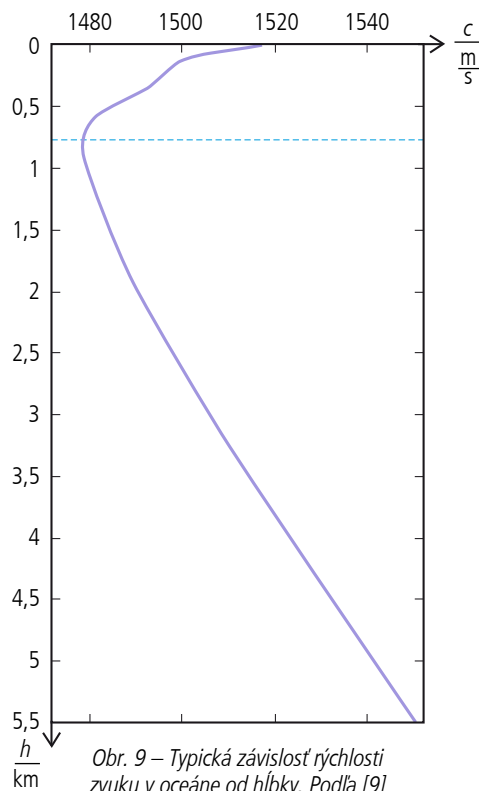
$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}},$$

kde K je modul objemovej pružnosti kvapaliny a ρ je jej hustota [1]. Obe veličiny závisia od teploty, tlaku a chemického zloženia danej kvapaliny. V prípade morí a oceánov od množstva rozpustených solí, tzv. salinity vody. Pri normálnych podmienkach je rýchlosť zvuku v slanej vode okolo $1450 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, v sladkej $1500 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ [7].

Teplota vody v jazerách, resp. v moriach a oceánoch, je vo veľkých hĺbkach prakticky stála a má hodnotu okolo $4 \text{ }^\circ\text{C}$ v sladkej vode, resp. $3 \text{ }^\circ\text{C}$ v slanej vode. Na povrchu teplota závisí od zemepisnej šírky a ročnej doby, napríklad v Perzskom zálive až $36 \text{ }^\circ\text{C}$, zatiaľ čo v polárnych oblastiach len $-2 \text{ }^\circ\text{C}$. Typický priebeh teploty vody v oceáne ukazuje obr. 8. V hĺbke niekoľko sto metrov dochádza k prudkému poklesu teploty vody (teplotný skok, tzv. thermocline) a ďalej do hĺbky teplota rovnomerne pomaly klesá. Salinita vody sa z hĺbkou prakticky nemení, výrazné rozdiely sú len v zálivoch, kam ústia mohutné rieky – povrchové vrstvy sú sladké, pod nimi je vrstva slanej morskej vody. Tlak v oceáne rastie rovnomerne s hĺbkou podľa vzťahu $p = p_0 + \rho \cdot g \cdot h$.



Obr. 8 – Závislosť teploty oceánu od hĺbky. Podľa [8]



Obr. 9 – Typická závislosť rýchlosti zvuku v oceáne od hĺbky. Podľa [9]

¹ juraj.slabeycius@ku.sk

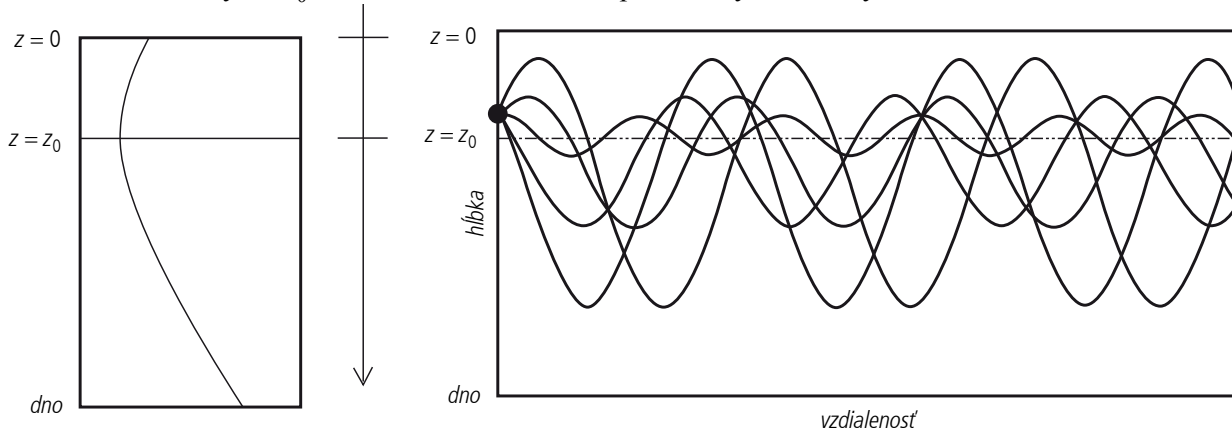
² http://sfs.sav.sk/smolenice/pdf_11/30_Slabeycius.pdf



Vplyv jednotlivých parametrov prostredia na rýchlosť zvuku vo vode vedie k typickému priebehu závislosti rýchlosti od hĺbky (obr. 9). Rýchlosť má v istej hĺbke minimum. Pri vhodných meteorologických podmienkach možno pozorovať iný typ závislosti – rýchlosť zvuku od hladiny najprv rastie, v hĺbke niekoľko desiatok metrov má maximum, potom klesá k minimum v hĺbke niekoľko sto metrov a smerom ku dnu monotónne rastie.

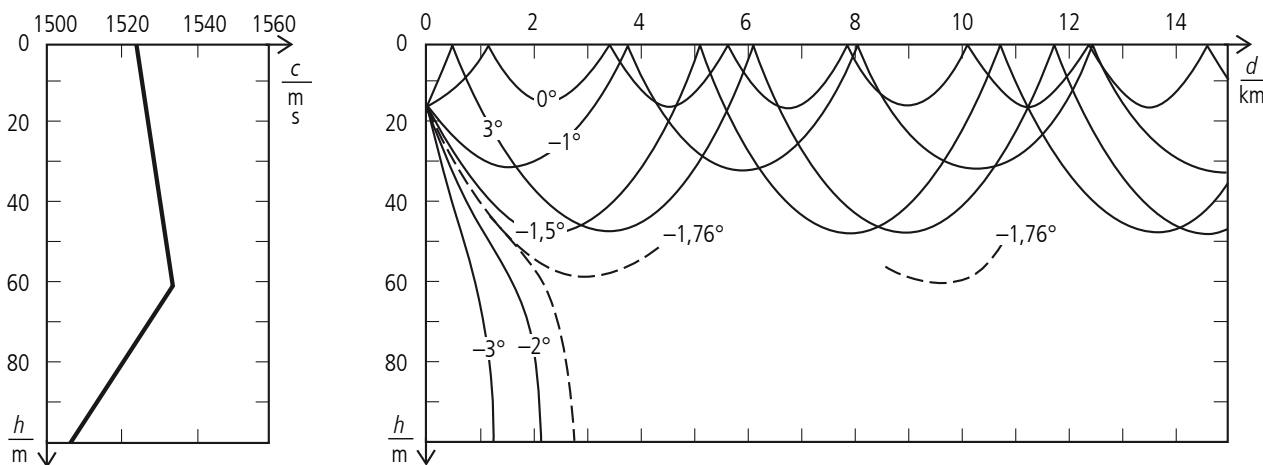
8 Šírenie zvuku v oceáne

Vyšetríme teraz šírenie zvuku v oceáne. Predpokladajme závislosť rýchlosti zvuku v oceáne od hĺbky podľa obr. 10. Súradnica z je orientovaná kolmo dole, pričom hodnote $z = 0$ zodpovedá hladina oceánu. V oblasti $0 < z < z_0$ rýchlosť zvuku klesá, v hĺbke $z = z_0$ nadobúda minimum a v oblasti $z > z_0$ stúpa. Zvukové lúče vychádzajúce zo zdroja pod morskou hladinou sa budú odkláňať na stranu menšej rýchlosti zvuku, t.j. v oblasti $0 < z < z_0$ budú zakrivené nadol, v oblasti $z > z_0$ sa zakrivia nahor (obr. 10). Výsledkom je, že sa zvuk s podvodného zdroja šíri len v úzkej oblasti okolo roviny $z = z_0$. Hovoríme, že zvuk sa šíri podmorským zvukovým kanálom.



Obr. 10 – Hlbokovodný zvukový kanál. Podľa [10]

Pomerne jednoducho sa dá spočítať, aký maximálny uhol s vodorovnou rovinou môže zvierat' zvukový lúč, aby nedopadol na hladinu oceánu, resp. aký maximálny záporný uhol, aby sa nepohltil na dne. Všetky lúče, ktoré vychádzajú zo zdroja v tomto intervale uhlov, budú oscilovať okolo osi zvukového kanála a intenzita zvuku v takomto kanáli bude klesať nepriamo úmerne vzdialenosti od zdroja, to znamená, že bude slabnúť podstatne pomalšie, ako keby sa zvuk šíril do celého priestoru. Napr. vo vzdialenosti 1 000 km od zdroja bude zvuk 1 000krát slabší, ako vo vzdialenosti 1 km, zatiaľ čo pri šírení zvuku do všetkých smerov (sférická vlna) by bol zvuk vo vzdialenosti 1 000 km zoslabený miliónnásobne. Hlbokovodný zvukový kanál v oceáne objavili nezávisle na sebe Leonid Brechovskich a Maurice Ewing [11].



Obr. 11 – Povrchový zvukový kanál. Podľa [10]



Ďalším dôležitým prípadom je situácia, keď v podpovrchovej vrstve rýchlosť zvuku s hĺbkou rastie (obr. 11). Na obrázku je zobrazený prípad, keď rýchlosť zvuku dosahuje maximálnu hodnotu v hĺbke 60 m, nad touto výškou sa zvukové lúče ohýbajú nahor a odrážajú sa od vodnej hladiny späť do oceánu. Pre zdroj v hĺbke 30 m sú vypočítané trajektórie lúčov s počiatočným sklonom k povrchu oceánu 3° , 0° , -1° , $-1,5^\circ$, -2° a -3° . Mierka obrázku vo zvislom a vodorovnom smere je rôzna, skutočné trajektórie lúčov sú oveľa plynulejšie. Napr. lúč vychádzajúci vodorovne zo zdroja sa odráža od hladiny mora každých 2 250 m, klesá do hĺbky 30 m. Lúč s počiatočným sklonom $-1,76^\circ$ je hraničným lúčom, pri svojom postupe sa dotýka roviny $z = -60$ m. Lúče s väčšou zápornou odchýlkou prejdú do oblasti opačného gradientu rýchlosti a zakrivia sa nadol, kde sa pohltia na morskom dne. Podrobnejšie sa s teóriou šírenia zvuku v oceáne čitateľ môže oboznámiť v knihe [12].

9 Dorozumievanie veľrýb

Veľryby, podobne ako delfíny, sú veľmi spoločenské zvieratá. Pretože v hĺbke je málo svetla, veľryby majú slabo vyvinutý zrak. Ich hlavným zmyslom je sluch. Navzájom sa dorozumievajú celou škálou zvukov od počuteľných až po ultrazvuk. Už v roku 1971 bola publikovaná práca [13], v ktorej sa upozorňuje na možnosť, že veľryby používajú podvodný zvukový kanál pre komunikáciu na veľké vzdialenosti, na stovky až tisíce kilometrov. Od tých čias túto hypotézu potvrdili mnohé výskumy. Niekedy používajú povrchový zvukový kanál, ale oblasti v oceáne, kde sú priaznivé podmienky pre existenciu takéhoto kanálu, sa nevyskytujú príliš často. Obvykle veľryby používajú na komunikáciu hlbokovodný zvukový kanál, pričom nie je nutné, aby sa ponorili až do hĺbky osi kanála. Častejšie však komunikujú priamo medzi sebou na vzdialenosť stoviek metrov až niekoľkých kilometrov.

Aj keď veľryby patria medzi cicavce, dokážu sa ponárať na dlhý čas do veľkých hĺbok. Rekordérom je vorvaň tuponosý, ktorý sa dokáže ponoriť do hĺbky viac ako 2 km a vydrží pod vodou až 2 hodiny. Jeho hmotnosť je okolo 50 ton, dĺžka 16–18 m (rekord 28 m, 150 ton). Dožije až 80 rokov. Zvuky, ktoré vydáva, sa podobajú na krátke ťuknutie, ktoré využíva na echolokáciu, podobne ako netopier. Dlhšie série pukotania slúžia pravdepodobne na komunikáciu. Ďalším druhom veľryby je vráskavec dlhoplutvý. Má dĺžku 12–16 m, hmotnosť 25–36 ton. Migruje ročne až 26 tisíc km, dosahuje rýchlosť $50 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Je schopný sa ponoriť do hĺbky 200 m na pol hodiny. Zvuky, ktoré vydáva, sa podobajú ľudskej hudbe, preto sú známe ako veľrybí spev. Najväčším žijúcim tvorom na zemeguli je vráskavec obrovský, ktorého priemerná dĺžka je 30 m a hmotnosť 180 ton. Jeho spev je v rozmedzí frekvencií 10–40 Hz.



Obr. 12 – Vráskavec dlhoplutvý (česky plejtvák dlouhoploutvý)³



Obr. 13 – Vorvaň tuponosý (česky vorvaň obrovský)⁴

³ http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9e/Humpback_stellwagen_edit.jpg, obrázek doplněn redakcí

⁴ <http://img534.imageshack.us/img534/5210/spermwhalelg.jpg>, obrázek doplněn redakcí



10 Záchrana pilotov v oceáne

Pred koncom druhej svetovej vojny, keď boli USA vo vojne s Japonskom, dostávali americkí piloti pred bojovými letmi nad oceán záchranný balíček, ktorý okrem lekárnice, nafukovacieho člna a zásoby vody a potravín obsahoval dve duté kovové guľky veľkosti pingpongových loptičiek. Piloti dostali inštrukciu, že ak sa im podarí prežiť zostrelenie a ocitnú sa v záchrannom člne na mori, majú hodiť jednu guľku do vody a čakať na záchranu. Ak pomoc nepríde do 24 hodín, hodiť do vody aj druhú guľku.

Guľka bola vyrobená tak, aby v určitej hĺbke pod tlakom vody praskla a rozbila sa. Takýto dej sa nazýva implózia a je (podobne ako explózia) doprevádzaný silným zvukovým efektom. Tlak bol zvolený tak, aby guľka praskla blízko osi hlbokovodného zvukového kanálu. Zvuk implózie sa zvukovým kanálom šíril na vzdialenosť tisícov kilometrov, takže ho mohlo zachytiť vojenské námorníctvo USA, ktoré malo na vhodných miestach oceánu lode vybavené citlivými hydrofónmi, spustenými do hĺbky zvukového kanálu. Pri zachytení signálu na najmenej troch lodiach (s určeným presného času prijatia signálu) bolo možné trianguláciou vypočítať presnú polohu zostreleného pilota. Metódu navrhol Maurice Ewing [4].

11 Roswellské UFO

V júli roku 1947 havaroval pri vojenskej základni v Roswelli tajomný objekt, ktorý novinári nazvali Roswellské UFO. Záhada zamestnávala americkú tlač niekoľko mesiacov a vláda USA bola obviňovaná, že utajuje kontakty s mimozemšťanmi. Pravda vyšla na povrch až v roku 1994, keď vláda USA odtajnila príslušné materiály o projekte MOGUL, ako o tom píše vo svojej knihe R. Muller [4].

Bolo to obdobie začínajúcej studenej vojny, keď USA mali monopol na atómovú bombu a žili v obavách, či ju náhodou nevyvinul aj Sovietsky Zväz. Pre Spojené štáty bolo veľmi dôležitým vedieť, či ZSSR neuskutočnil pokusný jadrový výbuch. V tých časoch neexistovali satelity ani nebola možnosť letecky monitorovať celý vzdušný priestor ZSSR, preto bolo treba nájsť inú metódu diagnostiky. Pri výbuchu atómovej bomby vzniká v atmosfére veľmi silná rázová vlna, ktorá sa šíri troposférou až do stratosféry. Na detekciu tejto vlny bol využitý stratosférický zvukový kanál. Ako je známe [3], teplota vzduchu vo vyšších vrstvách troposféry klesá až do výšky 10–12 km, v tropopause je viac menej konštantná, a od výšky 18–20 km začína znovu stúpať. V stratosfére sa teda nachádza zvukový kanál, ktorým sa môže zvuk šíriť na obrovské vzdialenosti. A práve tento jav bol použitý na detekciu prípadných jadrových výbuchov protivníka. Projekt MOGUL spočíval vo vytvorení niekoľkých špeciálnych stratosférických balónov, vybavených citlivými mikrofónmi a aparatúrami na príjem nízkofrekvenčných zvukových vln. Jeden z takýchto balónov havaroval pri Roswelli. Kvôli utajeniu vláda USA podporovala kryciu verziu o mimozemšťanoch.



Obr. 14 – Roswellské UFO⁵

Záver

Fyzika je jednou z najdôležitejších disciplín, ktorá má priamy dopad na rozvoj civilizácie a najmä jej zásluhou využívame všetky výhody prístrojov a technológií, ktoré nás obklopujú. Na druhej strane, fyzika má v súčasnej spoločnosti veľmi nízku popularitu a jej význam si málokto uvedomuje. Je preto veľmi dôležité popularizovať fyziku a neustále poukazovať na jej prínos pre priemysel, lekárstvo, a všetky oblasti ľudskej činnosti. Dúfame, že materiál uvedený v článku prispeje k zvýšeniu záujmu žiakov a študentov o fyziku.

⁵ <http://reinep.files.wordpress.com/2011/07/roswell-crashed-saucer-original-photo1.jpg>, obrázek doplněn redakcí

**Literatúra**

- [1] ILKOVIČ, Dionýz. *Fyzika I*. Bratislava: Alfa, 1969.
- [2] Dostupné na: <http://www.sengpielaudio.com/calculator-airpressure.htm>
- [3] BEDNÁR, Jan. *Meteorologie*. Praha: Portál, 2003.
- [4] MULLER, Richard A. *Physics for Future presidents. Ch.7 Waves*. Dostupné na: http://muller.lbl.gov/teaching/physics10/PffP_textbook/PffP-07-waves-5-27.htm
- [5] *The Free Dictionary by FARLEX. Atmospheric Acoustics*. Dostupné na: <http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Atmospheric+acoustics>
- [6] ROSS, Charles D. *Civil War Acoustic Shadows*. Shippensburg: White Mane Books, 2001.
- [7] LURTON, Xavier. *An Introduction to Underwater Acoustics*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2002.
- [8] *Windows to the Universe*. Dostupné na: <http://www.windows2universe.org/>
- [9] *Wikipedia*. Dostupné na: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:SOFAR.png>
- [10] *MetEd*. Dostupné na: <https://www.meted.ucar.edu/>
- [11] *Wikipedia*. Dostupné na: http://en.wikipedia.org/wiki/Leonid_Brekhovskikh
- [12] BRECHOVSKICH, Leonid M. *Volny v sloistych sredach*. Moskva, Leningrad: Izd. AN SSSR, 1957.
- [13] PAYNE, Roger and WEBB, Douglas. *Orientation by Means of Long Range Acoustic Signaling in Baleen Whales*. In: *Annals N.Y. Acad. Sci.*, vol. 188, 1971.