

RUDOLF BRÁZDIL — ZDENĚK OKÁČ

## PŘÍČINY SLAPOVÝCH JEVŮ A JEJICH INTERPRETACE V GEOGRAFICKÉ LITERATUŘE

### Úvod

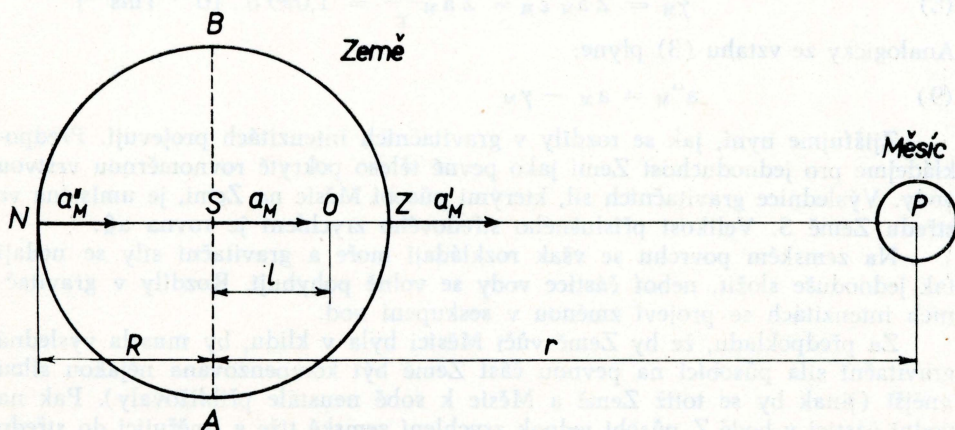
Předmětem výuky zeměpisu v 6. třídě základní devítileté školy (podle systému nové výchovně-vzdělávací soustavy již v 5. třídě) jsou i *mořské slapy (mořské dmutí)*, tj. *příliv a odliv*, probírané v kapitole Pohyby mořské vody (Janega a kol. 1962; Janega 1977). Ve středoškolské učebnici fyzické geografie tato témata bohužel chybí (Obermann 1969). Její význam z hlediska všeobecného vzdělání, světonázorového působení a pro studium geografie, stejně jako její nepoměrně menší zastoupení v našich učebnicích v porovnání se zahraničními, dostatečně zdůraznil O. Tichý (1962). Při výkladu příčin slapových jevů se však dopustil závažné chyby, spočívající v podstatě v nesprávné interpretaci vzniku přílivu a odlivu (Tichý 1962, 16—18; 1971, 285—288; 1976, 44; Tichý a Švec 1965, 67—72). Protože zmíněný chybný výklad je uveden i v jeho učebnici pro pedagogické fakulty Matematický zeměpis a kartografie (Tichý — Švec 1965), schválené výnosem ministerstva školství a kultury ze dne 10. února 1964 jako učebnice pro dálkové studium na pedagogických fakultách, která se prakticky od druhé poloviny 60. let používá jako jedna ze základních učebnic tzv. matematické geografie, mohou být v mysli mnoha geografů a učitelů geografie fixovány nesprávné představy o příčinách tohoto jevu. S nesprávnou interpretací příčin mořského dmutí se však lze setkat i jinde, např. v práci Z. Kukul a kol. (1977, 301).

Autoři předloženého příspěvku se proto snaží poukázat na omyly geografických interpretací a podat správný výklad vzniku mořského dmutí, i když ve zjednodušené formě vzhledem k obecnému fyzikálnímu pojetí (Bartels 1957), a to tak, aby byl dobře srozumitelný jak po stávající učitele geografie, tak i pro studenty pedagogických a přírodovědeckých fakult.

### Příčiny vzniku slapových jevů

Vznik *slapových jevů (mořského dmutí)* na Zemi je vyvolán gravitačními poli Měsíce a Slunce, které mají v různých místech povrchu Země různou intenzitu.

Vyšetřme nejprve samostatně působení Měsíce na Zemi. Nechť  $a_M^{\wedge}$ ,  $a_M^{\prime}$ ,  $a_M^{\prime\prime}$  jsou hodnoty intenzity gravitačního působení v bodech S, Z a N; v bodech Z a N přímka procházející středem Země S a Měsíce P protíná zemský povrch (obr. 1). V bodě Z je Měsíc v zenitu, v bodě N v nadiru.



1. Soustava Země — Měsíc se společným těžištěm v bodě O. Gravitační působení Měsíce na Zemi znázorněno úsečkami  $a_M^{\prime\prime}$ ,  $a_M$ ,  $a_M^{\prime}$ .

Gravitační zrychlení středu Země způsobené Měsícem je dáno vztahem:

$$(1) \quad a_M^{\wedge} = \kappa \cdot \frac{m_M}{r^2} = 3,3142 \cdot 10^{-5} \text{ [ms}^{-2}\text{]},$$

kde  $\kappa = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ [m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}\text{]}$  je gravitační konstanta,  $m_M = 7,36 \cdot 10^{22} \text{ [kg]}$  je hmotnost Měsíce a  $r = 3,844 \cdot 10^8 \text{ [m]}$  je průměrná vzdálenost středů Země a Měsíce.

Analogicky je:

$$(2) \quad a_M^{\prime} = \kappa \cdot \frac{m_M}{(r-R)^2}$$

$$(3) \quad a_M^{\prime\prime} = \kappa \cdot \frac{m_M}{(r+R)^2}$$

kde  $R = 6,378245 \cdot 10^6 \text{ [m]}$  je poloměr Země.

Ze vztahů (1) a (2) plyne:

$$(4) \quad a_M^{\prime} : a_M^{\wedge} = \frac{1}{(r-R)^2} : \frac{1}{r^2}$$

a nebo

$$(5) \quad a_M^{\prime} = a_M^{\wedge} \cdot \frac{r^2}{(r-R)^2}$$

Úpravou zlomku dostáváme:

$$(6) \quad \frac{r^2}{(r-R)^2} = \frac{1}{(1-\varepsilon_M)^2} \doteq 1 + 2\varepsilon_M$$

neboť  $\varepsilon_M = \frac{R}{r}$  je malé a řádově vyšší členy lze zanedbat.

Po dosazení tohoto vztahu do (5) získáme:

$$(7) \quad a'_M = a_M \cdot (1 + 2 \varepsilon_M) = a_M + \gamma_M$$

kde

$$(8) \quad \gamma_M = 2 a_M \varepsilon_M = 2 a_M \frac{R}{r} = 1,0998 \cdot 10^{-6} \text{ [ms}^{-2}\text{]}$$

Analogicky ze vztahu (3) plyne:

$$(9) \quad a''_M = a_M - \gamma_M$$

Zjišťujeme nyní, jak se rozdíly v gravitačních intenzitách projevují. Předpokládejme pro jednoduchost Zemi jako pevné těleso pokryté rovnoměrnou vrstvou vody. Výslednice gravitačních sil, kterými působí Měsíc na Zemi, je umístěna ve středu Země S. Velikost příslušného středového zrychlení je rovna  $a_M$ .

Na zemském povrchu se však rozkládají moře a gravitační síly se nedají tak jednoduše složit, neboť částice vody se volně pohybují. Rozdíly v gravitačních intenzitách se projeví změnou v seskupení vod.

Za předpokladu, že by Země vůči Měsíci byla v klidu, by musela výsledná gravitační síla působící na pevnou část Země být kompenzována nějakou silou vnější (jinak by se totiž Země a Měsíc k sobě neustále přibližovali). Pak na vodní částici v bodě Z působí jednak zrychlení zemské tíže  $g$  směřující do středu Země a gravitační zrychlení Měsíce  $a'_M$  opačného směru. Jejich výslednicí je zrychlení

$$(10) \quad G' = g - a'_M$$

směřující opět do středu Země. Důsledkem zeslabení zrychlení síly zemské tíže je pak zdvih vodních částic. V bodě Z by nastal příliv. Pro opačný bod N analogicky platí:

$$(11) \quad G'' = g + a''_M$$

tedy tíhové zrychlení je zesíleno, dochází k poklesu vodních částic. Nastal by zde odliv.

Ve skutečnosti však soustava Země—Měsíc vykonává otáčivý pohyb kolem společného těžiště soustavy (bod O v obr. 1). Toto těžiště leží na spojnici středů SP ve vzdálenosti:

$$(12) \quad l = \frac{m_M \cdot r}{m_Z + m_M} = 4,6672 \cdot 10^6 \text{ [m]}$$

kde  $m_Z = 5,98 \cdot 10^{24}$  [kg] je hmotnost Země a  $l$  vzdálenost těžiště soustavy od středu Země.

Každý bod zemského povrchu opisuje při tomto otáčivém pohybu kružnici o poloměru  $l$  (obr. 2). Odstředivé zrychlení dané tímto pohybem je kompenzováno dostředivým zrychlením. Toto dostředivé zrychlení je rovno gravitačnímu působení Měsíce na Zemi ( $a_M$ ) a jeho účinek si lze představit jako padání Země k Měsíci. Odstředivé a dostředivé zrychlení se však musí v pevném zemském tělese vyrovnat, aby nedocházelo ke změně vzdálenosti obou těles. Ze zrychlení  $a'_M = a_M + \gamma_M$  a  $a''_M = a_M - \gamma_M$  se projeví jen jejich části  $\gamma_M$ , neboť  $a_M$  je kompenzováno odstředivým zrychlením.

V bodě Z tedy dostáváme výsledné gravitační zrychlení od Měsíce  $\gamma_M$  a v bodě N zrychlení  $-\gamma_M$ . Vidíme tedy, že v místech Z a N je slapový účinek stejný, ale opačně orientovaný (vzhledem k S). Příliv tedy nastane nejen v bodě Z, ale i v protilehlém bodě N.

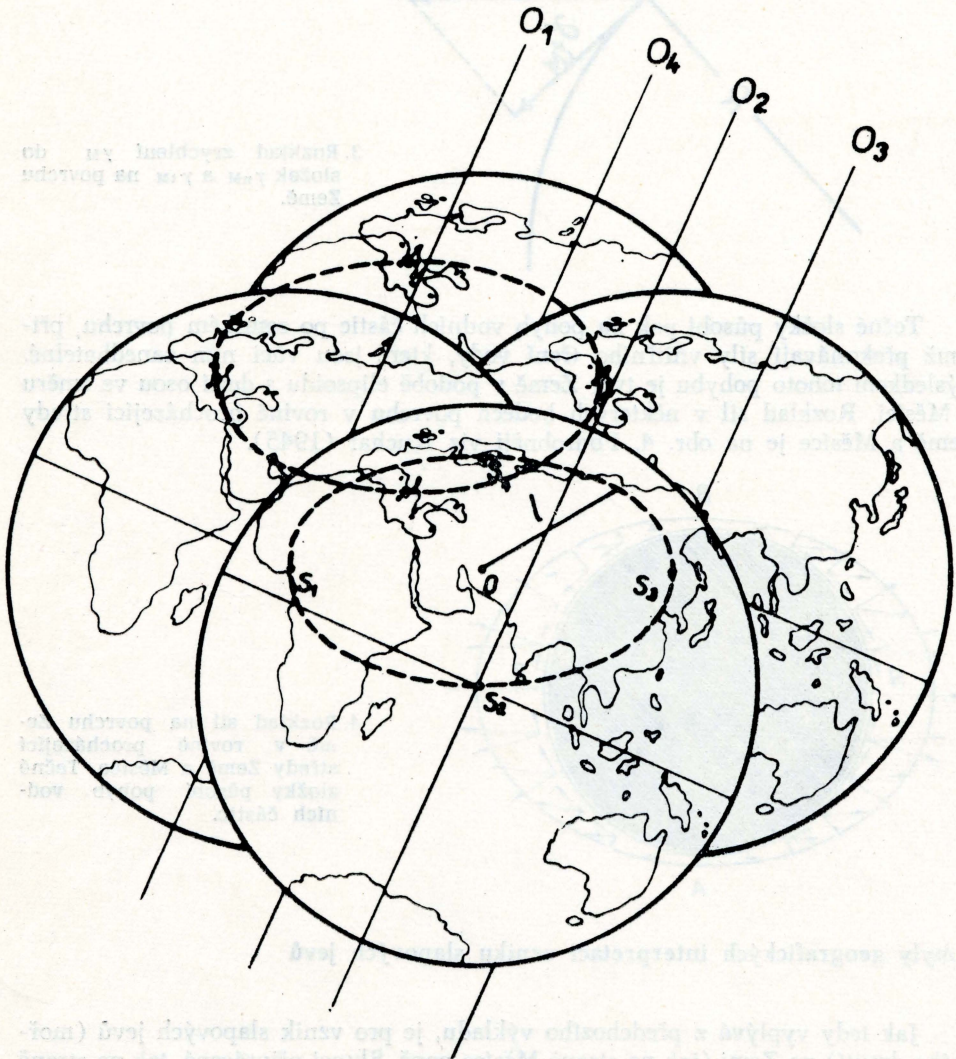


Analogickou úvahou lze získat  $\gamma_S$  pro Slunce. Ze vztahů (8) a (1) plyne:

$$(13) \quad \gamma_S = 2a_S \cdot \frac{R}{L} = 2\kappa \cdot \frac{m_S \cdot R}{L^3} = 0,50598 \cdot 10^{-6} \text{ [ms}^{-2}\text{]}$$

kde  $m_S = 1,991 \cdot 10^{30}$  [kg] je hmotnost Slunce a  $L = 1,496 \cdot 10^{11}$  [m] je střední vzdálenost Země a Slunce.

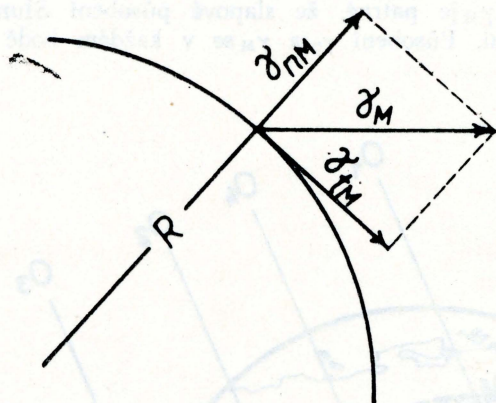
Z porovnání hodnot  $\gamma_S$  a  $\gamma_M$  je patrné, že slapové působení Slunce je asi 2,17 krát menší než měsíční. Působení  $\gamma_S$  a  $\gamma_M$  se v každém bodě zemského povrchu sčítají.



2. Při otáčivém pchybu soustavy Země — Měsíc kolem společného těžiště [bod 0 v obr. 1] opisuje každý bod zemského povrchu kružnici o poloměru  $l$ .

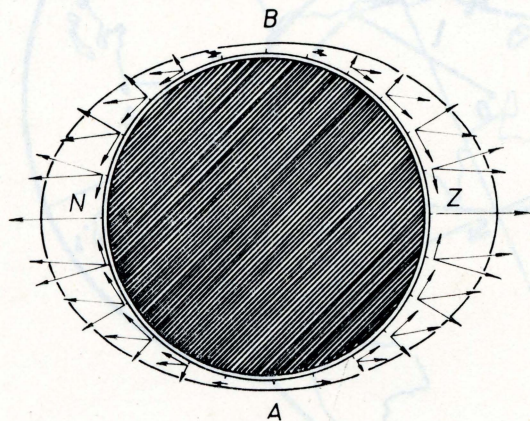


Vraťme se opět k samostatnému působení Měsíce na Zemi. Tak jako v bodech Z a N vzniká gravitační zrychlení  $\gamma_M$  i v ostatních bodech zemského povrchu. Přitom s rostoucí vzdáleností od bodů Z a N, kde je  $\gamma_M$  maximální, klesá jeho hodnota k nule v bodech A a B (obr. 1). Zrychlení  $\gamma_M$  nejsou v různých bodech zemského povrchu rovnoběžná a rozkládají se do normálových složek  $\gamma_{nM}$  a tečných složek  $\gamma_{tM}$  (obr. 3).



3. Rozklad zrychlení  $\gamma_M$  do složek  $\gamma_{nM}$  a  $\gamma_{tM}$  na povrchu Země.

Tečné složky působí pak na pohyb vodních částic po zemském povrchu, přičemž překonávají síly vnitřního tření vody, které jsou vůči nim zanedbatelné. Výsledkem tohoto pohybu je tvar Země v podobě elipsoidu s delší osou ve směru k Měsíci. Rozklad sil v některých bodech povrchu v rovině procházející středem Země a Měsíce je na obr. 4. Podrobněji viz Kuchař (1945).



4. Rozklad sil na povrchu Země v rovině procházející středem Země a Měsíce. Tečné složky působí pohyb vodních částic.

### Omyly geografických interpretací vzniku slapových jevů

Jak tedy vyplývá z předchozího výkladu, je pro vznik slapových jevů (mořského dmutí) na Zemi (jak na straně Měsíce popř. Slunci přivrácené, tak na straně odvrácené) rozhodující působení výsledného gravitačního zrychlení  $\gamma$ , tj. zrychlení vyvolaného gravitační silou Měsíce a Slunce. Vycházejí z výše uvedeného roz-

boru lze v souladu s prací J. Novotného (1978) poukázat na omyly, kterých se v úvodu citovaní autoři dopouštějí.

Chybné chápání příčin mořského dmutí některými geografy lze dokumentovat na citaci z práce O. Tichého a R. Švece (1965, 68): „Měsíc neobíhá kolem středu zeměkoule, nýbrž obě tato tělesa — Měsíc i Země — obíhají kolem společného těžiště, které leží na spojnici jejich středů 1 700 km pod povrchem Země. Při tomto pohybu Země vzniká odstředivá síla, která je samozřejmě největší v místě od těžiště nejbližším, tj. na straně zeměkoule od Měsíce odvrácené. Obě tyto síly — přitažlivá i odstředivá — působí velkou většinou proti sobě a ve středu Země jsou v rovnováze. Na straně Země k Měsíci přivrácené převládá však síla gravitační a na straně odvrácené, kde síla gravitační je vzhledem k větší vzdálenosti od Měsíce menší, převládne opět síla odstředivá. Každá z těchto sil vyvolává v místech svého převládajícího vlivu hromadění vodních mas... Rozhodující pro intenzitu dmutí je tedy velikost rozdílu síly gravitační a odstředivé v daném místě. Podobně jako Měsíc působí i Slunce... Také v tomto případě vzniká přitažlivou silou příliv na straně k Slunci přivrácené a odstředivou silou (Země spolu s Měsícem obíhá kolem Slunce) příliv na straně odvrácené.“ Za zmínku stojí i citát z další Tichého práce (Tichý 1962, 16): „A protože i naše vysokoškolské učebnice zeměpisu, geologie a astronomie ulpěly při výkladu mořských slapů jen na jedné z příčin jejich vzniku“ (autor má na mysli přitažlivou sílu Měsíce a Slunce), „předkládáme učitelům zeměpisu stručné pojednání, které vykládá vlastní příčiny vzniku a odlivu v duchu základních zákonů dialektiky“.

Nikdo z geografů v úvodu citovaných, u nichž se chybné interpretace příčin mořského dmutí objevují, se však nepokusil o matematické vyjádření slapových sil podle svých představ. Výpočtem lze totiž zjistit, že takto vychází slapová síla o více než jeden řád větší než podle klasické Newtonovy teorie. Slapové působení by potom byla dáno jen velkým rozdílem ve velikosti sil odstředivých; to, že „gravitační síla je na straně odvrácené menší“, by hrálo zcela zanedbatelnou roli. V naprostém rozporu s běžnými představami by tedy slapy nebyly působeny nehomogennou gravitačního pole.

Úvaha autorů je ve skutečnosti založena na chybné představě o pohybu Země a jeho dynamických důsledcích. Tento pohyb lze popsat jako superpozici translančního pohybu, při němž střed Země obíhá kolem těžiště soustavy Země—Měsíc po kružnici o poloměru 1 (avšak Země jako těleso nerotuje), a rotace Země kolem své osy (jeden obrat za hvězdný den). Tato rotace je (pomineme-li v této souvislosti bezvýznamné precesní jevy) rovnoměrná a jí způsobené odstředivé síly se tedy s časem nemění a nemohou mít proto vliv na časově proměnné děje jako jsou příliv a odliv.

Zbývá translanční pohyb, spojený s oběhem středu Země po kružnici okolo zmíněného těžiště, neboť zeměkoule nemá vázanou rotaci vůči Měsíci. Tento pohyb způsobuje vznik odstředivé síly, která je dána oběžným pohybem středu Země. Její pole však není osově symetrické a neroste se vzdáleností od osy jako u skutečné odstředivé síly dané rotací tělesa, nýbrž je to pole homogenní.

Proto tato síla není „samozřejmě největší v místě od těžiště nejbližším“, nýbrž je všude stejně velká, a působí proti přitažlivé síle Měsíce všude v zemském tělese a jeho obalu a nikoliv jen „velkou většinou“. Že slapy nemají nic společného s odstředivou silou v pravém slova smyslu je zřejmé z toho, že k nim dochází i tehdy, když tělesa k sobě padají po přímce bez jakéhokoliv otáčení.

Avšak ani zde popsanou odstředivou sílu nelze považovat za jednu ze dvou příčin slapových jevů (vedle přitažlivosti), jak to ve svých pracích navrhuje např. O. Tichý. Kdyby Země při nezměněné hmotnosti měla podstatně menší poloměr, nezměnila by se ani velikost této odstředivé síly, ani měsíční přitažlivost, avšak slapové jevy by se zmenšily. Z toho jasně vyplývá, že jedinou příčinou slapových jevů je v souladu s klasickým výkladem nehomogenita gravitačního pole Měsíce a Slunce, jak správně uvádí také Kuchař (1945).

#### Literatura

- BAKULIN P. I., KONONOVICH E. V., MOROZ V. I. (1966): Kurs obščej astronomii. Nauka, Moskva, 528.
- BARTELS J. (1957): Gezeitenkräfte. Handbuch der Physik, Berlin—Göttingen—Heidelberg, 734—774.
- JANEGA P. (1977): Zeměpis 5. Pokusná učebnice pro 5. ročník základních škol, I. část, SPN, Praha, 156.
- JANEGA P., OBERMANN A., ŠÍPEK J. (1962): Metodický průvodce k učebnici zeměpisu pro 6. ročník. SPN, Praha, 38.
- JERMOLAJEV M. M. (1976): Vveděnije v fyzičeskiju geografiju. Izdatělstvo Leningradskovo universitěta, Leningrad, 260.
- KUKAL Z. a kol. (1977): Základy oceánografie. Academia, Praha, 510.
- OBERMANN A. (1969): Zeměpis III. Pro 3. ročník středních všeobecně vzdělávacích škol. SPN, Praha, 264.
- NOVOTNÝ J. (1978): Rozbor omylů při vysvětlování slapových jevů v učebnici Matematický zeměpis a kartografie. Rukopis, nepublikováno.
- RAKIČEVIČ T. L. (1971): Opšta fizička geografija. 3. vyd., Beograd, 387.
- TICHÝ O. (1962): Poznámky k tématu „Dmutí moře“. Dějepis a zeměpis ve škole. V (1962—63), 1:16—18.
- TICHÝ O. (1971): Výzkum koncepce trojrozměrných pomůcek v geografii. In: Acta Universitatis Palackianae Olomucensis Facultas Rerum Naturalium, Tom. 35, Geographica—Geologica XI, 261—322.
- TICHÝ O. (1976): Geografie a ideologie. Sborník statí K ideologickým a metodologickým problémům geografie. PFF UJEP, Brno, 42—45.
- TICHÝ O., ŠVEC R. (1965): Matematický zeměpis a kartografie. Učebnice pro pedagogické fakulty, SPN, Praha, 320.
- ZÁVIŠKA F. (1933): Mechanika. S užitím druhého vydání Strouhalovy—Kučerovy mechaniky. Jednota čs. matematiků a fyziků, Praha, 606.
- KUCHAŘ K. (1945): Výklad přílivu a odlivu. Zvláštní otisk z časopisu „Příroda“, Brno, 1945.