

Literatura

- [1] Fyzika, Matematika a Informatika na Matematicko-fyzikální fakultě Univerzity Karlovy. Vydal MATFYZPRESS, Reprintředisko MFF UK, Praha 1995.
- [2] Univerzita Karlova v Praze. Matematicko-fyzikální fakulta. Nakladatelství Karolinum. 2002.
- [3] MATFYZ 60. 60 let Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy. Vydal MATFYZPRESS, vydavatelství Matematicko-fyzikální fakulty UK v Praze. Praha 2011.
- [4] <http://www.mff.cuni.cz/win.cs/fakulta/historie>

Hrozba z vesmíru

VLADIMÍR ŠTEFL – JULIUSZ DOMANSKI

Přírodovědecká fakulta MU, Brno – Toruň, POLSKO

Počátkem loňského roku přinesl tisk zprávu, že 7. ledna 2011 v 20 hod. 39 min. SEČ planetka 2011 CQ1 proletěla rekordně blízko naší Země, její minimální vzdálenost činila pouze 5 480 km. Byla objevena jen několik dnů dříve, 4. ledna 2011 americkým projektem *Catalina Sky Survey* pro monitorování objektů blízkých Zemi. Hrozilo obyvatelům zeměkoule nebezpečí? V tomto případě nikoliv, neboť šlo o malé těleso – meteoroid o průměru zhruba 2 metry, které by při případném pádu shořelo v atmosféře. Obdobných planetek je velké množství, ve sluneční soustavě miliony.

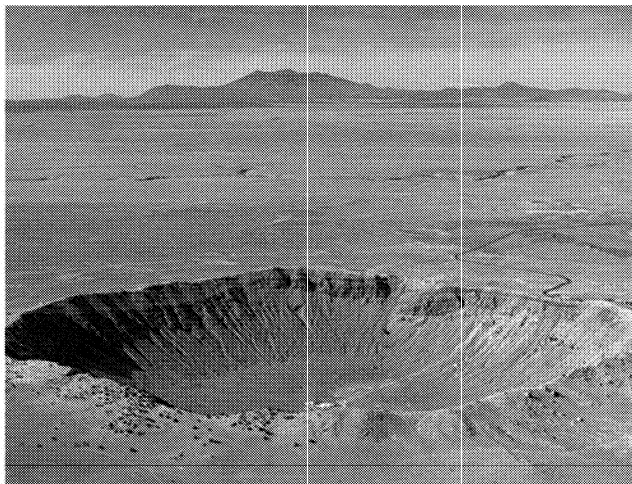
Za účelem jejich sledování vzniklo především v USA několika projektů, např. Spaceguard, LINEAR (*Lincoln Near – Earth Asteroid Research*), NEO (*Near – Earth – Object*) Spacewatch atd. Úkolem bylo především hledání planetek přibližujících se Zemi z hlavního pásu mezi Marsem a Jupiterem, jejich odhadovaný počet je více než 7 000. Postupná realizace prohlídek oblohy vedla logicky od těles větších k menším. V současné době jsou zkoumány planetky o velikostech (100 – 140) metrů. Podle odhadu jich doposud bylo objeveno (10 – 15) %.

V minulosti Země nastaly dopady planetek na povrch Země. V nedávné době největší událostí byla exploze planety 30. června 1908 nad oblastí řeky Podkamennaja Tunguzska na Sibiři. Podle nejnovějších modelů [1] došlo k výbuchu tělesa s pravděpodobně uhlíkatým jádrem o průměru 30 m,

ve výšce 13 km, při němž byla uvolněna energie $\approx 10^{16}$ J, odpovídající 4 MTNT. Důsledkem exploze byl vznik rázové vlny vedoucí k povalení stromů v okruhu 40 km (obr. 1). Viditelnost jevu byla do vzdálenosti 650 km, „bílou noc“ pozorovali například v Londýně.



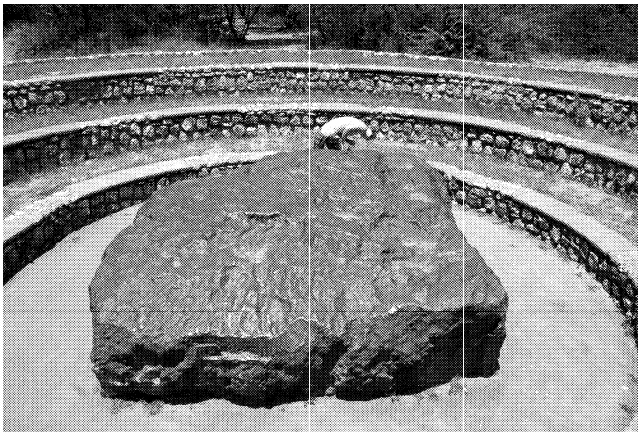
Obr. 1



Obr. 2

Velmi známým je tzv. Barringerův kráter v Arizoně, jehož stáří je zhruba 50 000 roků. Kráter má v průměru 1,5 km (obr. 2). Těleso, které vedlo k jeho vzniku, mělo průměr 150 m, hmotnost $3 \cdot 10^9$ kg.

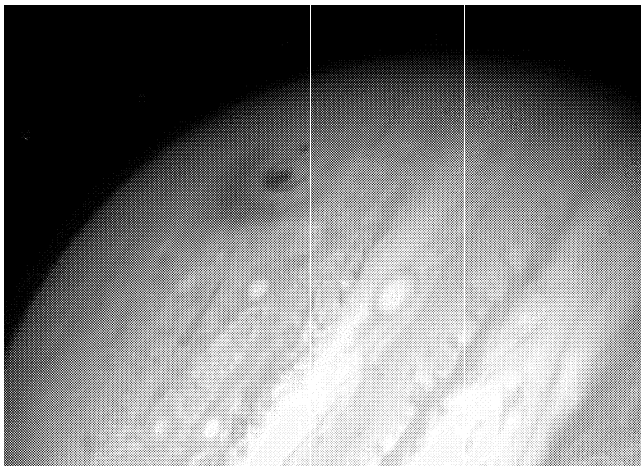
Impaktních kráterů na povrchu Země známe téměř dvě stě. Jedním z nich je kráter Chicxulub na poloostrově Yucatán v Mexiku o průměru asi 180 km, v němž se nalézají rázově přeměněné horniny o stáří 65 milionů roků, [2]. Impaktní energie uvolněná při dopadu byla odhadnuta na řádově 10^{24} J. Krátery se rovněž nacházejí pod příkrovem ledu v Antarktidě, největší dosud objevený má průměr více než 500 km a stáří 250 milionů roků. Planetka, která vytvořila tento kráter, měla průměr zhruba 40 km. Meteority, které dopadly na Zemi, známe z mnoha případů. Nejhmotnější železný o hmotnosti 60 tun je Hoba v Jižní Africe (obr. 3).



Obr. 3

Jak je zřejmé, dopady planetek na větší kosmická tělesa ve sluneční soustavě byly zejména v minulosti velmi časté, o čemž svědčí vzhled například Merkuru, Měsíce či Marsu. Určitě také tělesa dopadají na plynné planety Jupitera či Saturn. V březnu roku 1993 objevená kometa Shoemaker-Levy 9 se rozpadla při průchodu v blízkosti Jupitera na více než 20 úlomků, které 16. července 1994 dopadly na Jupiter. Astronomové podrobně zkoumali pád jednotlivých úlomků. Typické parametry úlomků byly $\rho \approx (0,6 - 0,9) \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $d \approx 1 \text{ km}$, $M \approx 10^9 \text{ kg}$, $v \approx 60 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,

$W_k \approx 10^{18}$ J. Uvolněná energie měla za následek teplotní změny v atmosféře, různé typy vln, záření, její část se transformovala na kinetickou energii látky vytvářející chochol – ohnivou kouli. Místo dopadu úlomků s původní teplotou 130 K, se zahřálo na 24 000 K. Následně po čtyřiceti sekundách teplota poklesla na asi 1 500 K. Dopadová stopa dosáhla průměru $\approx 10\,000$ km. Jedním z nejprozkoumanějších byl dopad úlomku G (obr. 4), u něhož uvolněná energie po dopadu dosáhla 10^{19} J, dopadová stopa činila až 12 800 km.



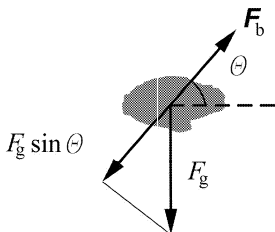
Obr. 4

Výsledkem výzkumu bylo zjištění fyzikálních a chemických vlastností vertikální struktury atmosféry Jupitera, obsah kyslíku. Srážkové efekty se ukázaly mnohem výraznější, než se očekávalo.

Přejdeme k fyzikálnímu rozboru pohybu planetky v zemské atmosféře, je zachycen například v [3], [4], [5]. Ve větších výškách, např. řádově 100 km, je atmosféra složena především z dusíku a kyslíku, hustota a tlak vzduchu jsou stovky milionů krát menší, než u povrchu Země. Planetka je při průletu ovzduším podrobena intenzivnímu bombardování molekulami vzduchu, které při pružných srážkách se odrážejí, respektive narušují povrchovou vrstvu jádra planetky. Při dalším sestupu níže dochází k narůstání odporu atmosféry, planetka je zbrzdována v pohybu, povrchová vrstva se zahřívá, narušuje a následně vypařuje. Při průchodu planetky atmosférou

narůstá dynamický tlak na náběžnou stranu planetky, ablace absorbuje tepelnou energii emitovanou horkými plyny.

Provedeme rozbor pohybu planetky při zjednodušujícím předpokladu o jádře planetky modelovaném pomalu rotující koulí. Vyjádříme působící síly na planetku, uvažujeme sílu přitažlivosti Země a brzdící sílu vyvolanou odporem vzduchu (obr. 5).



Obr. 5

Obdržíme v prvním přiblížení pohybovou rovnici $F = F_b + F_g \sin \Theta$, kde Θ je úhel svírající směr pohybu s horizontem. Brzdící síla F_b je úměrná hustotě atmosféry ρ a druhé mocnině rychlosti pohybu v^2 , ploše C průřezu ve směru pohybu. Platí známý vztah $F_b = -\frac{1}{2}CS\rho v^2$ a výsledná pohybová rovnice má tvar

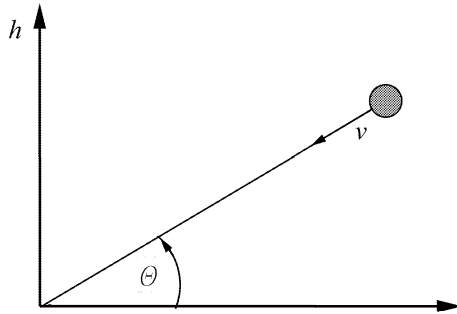
$$ma + \frac{1}{2}CS\rho v^2 = mg \sin \Theta. \quad (1)$$

Síla odporu prostředí zpomaluje pohyb planetky, zatímco gravitační síla ho urychluje ve směru k hmotnému středu Země.

Neprobíhá však pouze nárůst rychlosti planetky, nýbrž také změna směru jejího pohybu (obr. 6). Atmosférický vztlak ovlivňuje pohyb ve směru horizontálním. Platí

$$\frac{d\Theta}{dt} = -\frac{g \cos \Theta}{v} - \frac{C_L \rho S v}{2m} - \frac{v \cos \Theta}{R_Z + h}, \quad (2)$$

kde C_L je koeficient vztlaku, závislý na tvaru jádra planetky. První člen na pravé straně rovnice je vyjádřením gravitační složky, druhý charakterizuje atmosférický vztlak a třetí zachycuje působící gravitaci Země. Rychlost pohybu planetky při vstupu do atmosféry závisí na jejích dráhových elementech, činí zpravidla $(11,2 - 73,4) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ vzhledem k Zemi a převyšuje tedy rychlost zvuku v atmosféře, jde o pohyb hypersonický.



Obr. 6

Jak se mění gravitační zrychlení a_g a hustota ρ atmosféry s výškou? Závislost gravitačního zrychlení na výšce vyjadřuje vztah

$$a_g(h) = a_{g0} \left(\frac{R_Z - h}{R_Z} \right)^2,$$

kde $a_{g0} \approx g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, $R_Z = 6,371 \cdot 10^6 \text{ m}$ je poloměr Země. Pro závislost hustoty na výšce platí

$$\rho(h) = \rho_0 e^{-\frac{h}{H}},$$

kde $H = 8100 \text{ m}$ je tlaková škálová výška zemské atmosféry, tzn. výška, v níž hustota klesne na $1/e$ své hodnoty.

Řešení výše uvedených rovnic (1), (2) při zadaných počátečních podmínkách lze provést numericky užitím tabulkového kalkulátoru či PC, u nichž lze snadno měnit počáteční podmínky. Vhodné parametry pro výpočty lze nalézt v [6].

V principu existují tři možné scénáře průchodu atmosférou: buď jádro planety celé shoří a jeho hmotnost se redukuje na nulovou, nebo vnitřní tlak v jádře planety vede k překročení meze tečení, následuje exploze v atmosféře a vznik rázové vlny. Další možností je velký nárůst tlaku vzduchu, který nestačí obtékat těleso. Na čelní stěně dochází k jejímu intenzivnímu zahřívání a narušení soudržnosti materiálu. Následuje celkové rozrušení jádra planety a jeho výbuch.

K přiblížení problematiky a získání číselných představ lze žákům zadat zjednodušené úlohy:

1. Častým námětem katastrofických filmů je dopad planetek na povrch Země. Nechť jádro planetky dopadne do oceánu rychlostí $10 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Pro zjednodušení předpokládejme jeho sférický tvar o průměru 3 km a hustotě $2 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Určete velikost uvolněné energie a porovnejte ji s energií uvolňovanou při erupcích sopek, která dosahuje $4,2 \cdot 10^{17} \text{ J} \approx 100 \text{ MTNT}$, připomínáme, že 1 MTNT odpovídá energii $4,2 \cdot 10^{15} \text{ J}$. Jak velké množství vody se při pádu do oceánu vypaří?

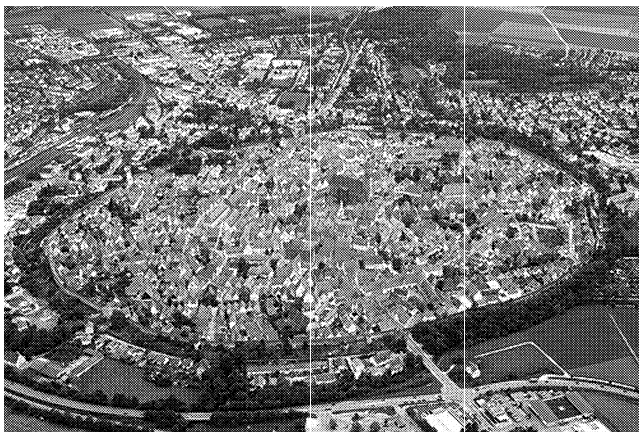
Stanovíme hmotnost jádra planetky $M = \rho V = 2,8 \cdot 10^{13} \text{ kg}$, kinetická energie uvolněná při dopadu je $\frac{1}{2} M v^2 = 1,4 \cdot 10^{21} \text{ J}$, tedy mnohem větší než při erupcích sopek. Množství vypařené vody určíme ze vztahu $m = \frac{E_k}{l_v}$, kde $l_v = 4,5 \cdot 10^6 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Po dosazení za zjednodušujících předpokladů, při $\rho_v = 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ dostaneme objem vypařené vody $V = 600 \text{ km}^{-3}$.

2. Určete pomocí empirického vztahu $D \simeq D_0 \left(\frac{E_k}{E_{k0}} \right)^{0,294}$, kde $D_0 = 15 \text{ km}$, $E_{k0} = 10^{20} \text{ J}$ přibližnou hmotnost a poloměr planetky – meteoritu Ries, po jehož dopadu zůstal v Německu kráter o průměru $D = 24 \text{ km}$, na němž se nachází město s kruhovým půdorysem (obr. 7). Předpokládejme modelovou rychlost dopadu $25 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ a hustotu $\rho = 3 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Ze vztahu $D \simeq D_0 \left(\frac{E_k}{E_{k0}} \right)^{0,294}$ nejprve stanovíme $E_{k0} = 5 \cdot 10^{20} \text{ J}$. Odtud určíme při předpokladu $v = 25 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ hmotnost meteoritu $M = 1,6 \cdot 10^{12} \text{ kg}$. Poloměr stanovíme ze vztahu

$$R = \sqrt[3]{\frac{M}{\frac{4}{3}\pi\rho}} = 500 \text{ m}.$$

S určitou pravděpodobností možnost střetu Země s jiným kosmickým tělesem ze sluneční soustavy existuje, lze ji v předstihu předpovědět [7]. Jaké jsou možnosti ochrany před pádem planetky, či komety na Zemi? Rozvoj vědy a techniky umožňuje pracovat nové myšlenky likvidace těchto kosmických těles ohrožujících Zemi. Řada z nich se již dočkala filmových zpracování, přestože jsou většinou značně nereálné. Například vyslání k blížícímu se tělesu posádky s úkolem jeho rozbití na menší úlomky. Zřejmě by to nebyla nejlepší metoda ochrany, neboť menší úlomky by při svém pádu na Zemi mohly způsobit stejnou škodu jako původní těleso. Reálnější se jeví umístění speciálních raket na těleso a jeho vychýlení ze směru pohybu k Zemi.



Obr. 7

V každém případě v budoucnosti problematice ohrožení Země z kosmu bude muset lidstvo věnovat pozornost. Proto jsou vyhledávací programy takových objektů podporovány a rozvíjeny.

Literatura

- [1] *Chyba, C., Thomas, P., K. Zahnley.*: The 1908 Tunguska explosion: Atmospheric disruption of a stony asteroid. *Nature* 391 (1993), p. 40-44.
- [2] *Alvarez, L. W., Alvarez, W., Asaro, F, Michel, H. V.*: Extraterrestrial cause for Cretaceous – Tertiary extinction. *Science* 208 (1980), p. 1095–1108.
- [3] *Bland, P. A. – Artemieva, N. A.*: Efficient disruption of small asteroids by Earth's atmosphere. *Nature* 424 (2003), p. 288–290.
- [4] *Domingos, R. C. – Winter, O. C.*: Possibility of collision between co-orbital asteroids and the Earth. *Computational applied mathematics*, vol. 24, 2005, No. 1, p. 99–107.
- [5] *Thomas, P. J. – Goulet, M. – Philips A.T. – Smith, A.*: Ablation, aerobraking and airbursting of a hypersonic projectile in Earth's atmosphere. vol. 40 (2002), p. 487–492.
- [6] *Metz, D. – Stinner, A.*: Deep Impact: The Physics of Asteroid/Earth Collisions. *The Physics Teacher*, vol. 40 (2002), p. 487–492.
- [7] *Vanýsek, V.*: Kosmické katastrofy. *PMFA*, vol. 38 (1993), p. 269–288.