

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Vladimír Vanýsek
Kosmické katastrofy

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 38 (1993), No. 5, 269--288

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/139111>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1993

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

- [5] A. EDEN: *The Search for Christian Doppler*. Springer Verlag 1992.
- [6] J. FOLTA: *Základy geometrie v pracích českých matematiků 19. století*. Sborník pro dějiny přírodních věd 11, Academia, Praha 1966.
- [7] CH. DOPPLER, *Annalen der Physik und Chemie* 49 (1839), 505.
- [8] CH. DOPPLER, *Abhandlungen d. Königlichen böhmischen Gesellschaft der Wissenschaften* 3 (1845).
- [9] E. MACH: *Optisch-akustische Versuche*. Prag, 1873.
- [10] F. JÍLEK, V. LOMIČ: *Dějiny Českého vysokého učení technického*. Praha 1973, 1978.
- [11] CH. DOPPLER: *Über das farbige Licht...*. *Abhandlungen* 2 (1842), též Borrosch & André, Praha 1842.
- [12] CH. DOPPLER: *Beiträge zur Fixsternenkunde*. Borrosch & André, Praha 1846.
- [13] CH. DOPPLER, *Almanach d. österreichischen Akademie d. Wissenschaften* 1043 (1953).
- [14] H. A. LORENTZ: *Abhandlungen von Christian Doppler*. Engelman, Leipzig 1907.

Fotografie a reprodukce: MARTIN ŠTOLL

Kosmické katastrofy

Vladimír Vanýsek, Praha

Stále hojněji se ve sdělovacích prostředcích objevují zprávy o dávných, ale především budoucích kosmických katastrofách, které nepochybně čas od času postihovaly a mohou postihnout naši planetu při jejím střetu s kosmickým tělesem větších rozměrů, například s kometou nebo malou planetkou. Tyto zprávy se většinou opírají o seriózní úvahy neméně seriózních odborníků, ale v žurnalistickém přetlumočení jsou téměř vždy značně zkreslené. Veřejnosti je tak nezřídka předkládáno cosi, co možno nazvat (dle Normana Mailera) faktoidem, jde tedy o pseudofakt vyprodukovaný sdělovacím prostředkem. Vznik takového „faktoidu“ o srážce Země s asteroidem nebo kometou, v historicky krátké budoucnosti, lze názorně demonstrovat hned na dvou případech z nedávné doby. V prvním případě jde o planetku Toutatis, která patří do skupiny planetek křížících dráhu Země označované zkratkou ECA (Earth-Crossing-Asteroids). Dne 9. prosince 1992 minula Zemi v minimální vzdálenosti 0,024 astronomických jednotek (3,6 milionů km). To umožnilo „mapování“ povrchu planetky pomocí výkonných radarů. Další těsné přiblížení tohoto nevelkého tělesa (maximální rozměr se odhaduje na 6 km) k naší planetě bude 26. září roku 2000. O tom všem napsala francouzská astronomka Lvasseur-Regourdová článek do časopisu *Science et l'Avenir*,

Prof. RNDr. VLADIMÍR VANÝSEK, DrSc. (1926), Astronomický ústav MFF UK, Švédská 8, 150 00 Praha 5.

odkud si nějaký novinář vybral jako hotovou věc, že v roce 2000 dojde ke srážce planety se Zemí. Je pozoruhodné, že podobný rozruch nezpůsobil objev planety nesoucí prozatímní označení 1991BA, která v roce 1991 minula Zemí ve vzdálenosti jen 150 000 km!

Ještě větší publicitu měl druhý případ, tj. zpráva, že 14. srpna 2126 dojde ke srážce Země s periodickou kometou Swift-Tuttle. Tato kometa, nezávisle objevená L. Swiftem a H. Tuttleem roku 1862, byla objektem nenápadným na hranici viditelnosti pouhým okem. Právě tak se jevila i po 130 letech, kdy opět prošla přísluním 12. prosince 1992. To, co činí z této průměrné komety objekt zajímavý, je významná skutečnost, že její dráha v sestupném uzlu téměř protíná dráhu Země. Tímto bodem prochází naše planeta vždy kolem 12. srpna. Několik dnů před a po tomto datu lze pozorovat na noční obloze poměrně značné množství meteorů vylétajících zdánlivě ze souhvězdí Persea. Jde o meteorický roj tzv. Perseid. Je to meteorický materiál, který se uvolňuje z jádra komety a rozptýlen podél její dráhy se každoročně střetává se Zemí. Malé meteorické částice vlétají rychlostí 61 km s^{-1} do zemské atmosféry, kde shoří. Podobně existuje přímá souvislost jiných meteorických rojů s jinými známými periodickými kometami, z nichž některé, například Giacobini-Zinner, se mohou ke dráze Země přiblížit ještě těsněji než kometa Swift-Tuttle. Je zde tedy jistá, nenulová pravděpodobnost, že místo srpnových Perseid nebo jiného meteorického roje, odpadu z kometárního jádra, někdy v budoucnosti dopadne na zemský povrch samotné jádro komety. Ale až donedávna se o takovém střetu Země a některé známé komety vážně neuvažovalo. Teprve po znovuobjevení komety Swift-Tuttle v roce 1992 jeden z nejlepších odborníků na výpočty drah planet Brian Marsden ze Smithsoniánské astrofyzikální observatoře poukázal na zdánlivé obtíže ve stanovení dráhy této komety. Zjistil, že její současná oběžná doba je 135 let a následující průchod přísluním lze očekávat 11. července 2126. Ale pokud by se kometa na své dráze opozdila o 15 dní, mohlo by dojít ke střetu komety se Zemí 14. srpna téhož roku [1]. Ovšem přesnost určení drah kosmických těles je závislá na přesnosti pozorování, a to i těch získaných v minulých stoletích. A taková bylo nutno v tomto případě použít, i když byla zatížena systematickými chybami. Dalším problémem jsou neregulární síly působící na pohyb komety. Jsou vyvolány neizotropním výronem sublimujících plynů z jádra komety. Výron plynů převládá směrem ke Slunci, a tak vzniká raketový efekt, který může rychlost komety nepatrně zmenšit a též zvětšit, což se zřetelně projeví především ve změně doby oběhu kolem Slunce. Protože z prvních pozorování nebylo možno přesně určit možné účinky neregulárních sil, upozornil Marsden na onu naprosto hypotetickou možnost (s pravděpodobností 10^{-4}) fatálního zpoždění komety o 15 dní. Stačilo však, aby se jeden z mladších australských astronomů o tomto zcela předběžném výsledku zmínil na veřejné populární přednášce před dopisovatelem agentury Reuter a „faktoid“ vzápětí oběhl svět. Přesný rozbor většího počtu později získaných pozorování potvrdil, že k žádné takové srážce v roce 2126 nedojde [2]. Z šedesáti známých planetek patřících do skupiny těch těles, která možno považovat za skutečně nebezpečná, ani jedno neohrozí v budoucím století naši planetu. Totéž platí o všech známých periodických kometách [3].

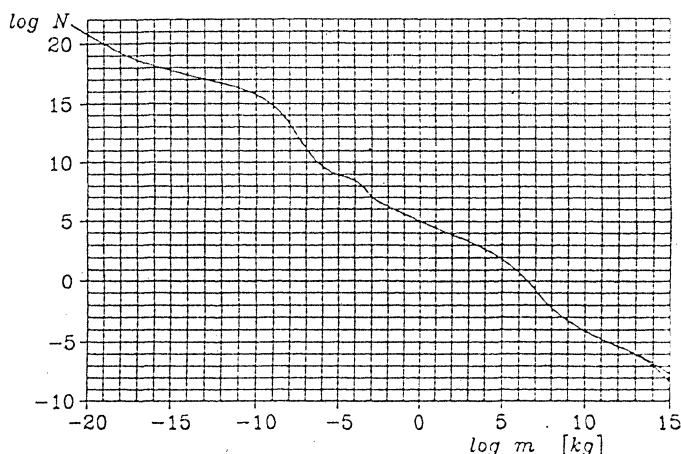
Kosmické srážky jako reálné riziko

Jestliže v těchto dvou výše popsaných případech lze katastrofickou srážku se Zemí vyloučit a ani žádný jiný známý asteroid nebo kometa nás v nejbližších stoletích neohrozí, neznamená to, že lze problém kosmických katastrof odsunout do kategorie nepřilišit plodných úvah. Naopak, jde o téma hodné pozornosti. Rozsáhlý výzkum sluneční soustavy v posledních desetiletích rozšířil naše znalosti nejen o velkých planetách a jejich satelitech, ale i o malých tělesech potulujících se meziplanetárním prostorem. Jsou to nejen nepatrné mikroskopické částičky meziplanetárního prachu nebo o něco větší meteorická tělíska, ale především tělesa o rozměrech mezi desítkami metrů až stovkami kilometrů, jako jsou malé planetky (asteroidy) nebo jádra komet. A právě tato populace příslušníků sluneční soustavy je zajímavá z hlediska diskusí o možných kosmických srážkách, které mohou postihnout Zemi. Ukazuje se, že počet malých asteroidů o rozměrech několika set metrů až kilometrů, které se na svých drahách značně přibližují ke dráze Země, — podobně jako již zmíněná planetka Toutatis — je podstatně větší, než se ještě před několika málo lety předpokládalo. První takovou planetkou byla planetka Apollo objevená v roce 1930 a po řadu let se soudilo, že podobných těles existuje jen několik. Teprve v posledních třech desetiletích počet objevů těchto těles každým rokem roste a zcela nedávno se pro ně zavedlo souborné označení Near-Earth-Objects (NEO), ve které ECA tvoří podskupinu těles doslova křižujících dráhu Země. V současné době je jich známo něco přes dvě stě. Vyhledávání těchto těles je dokonce již částečně automatizováno. Od září 1990 pomocí počítačem automaticky řízeného teleskopu Arizonské univerzity, nazvaného přílehavě „Spacewatch“, bylo objeveno několik desítek těles o rozměrech několika set metrů. Předběžné úvahy (v mezích zatím velmi problematické extrapolace dosavadní statistiky objevů) vedou k závěru, že počet těles o rozměrech 20 metrů a menších, která se mohou velmi těsně přiblížit k dráze Země, je někde mezi 10^4 až 10^6 . Poněvadž dopad kosmického tělesa o průměru několika desítek metrů rychlostí nejméně 16 km za sekundu do hustě obydlené oblasti by znamenal sice lokální, ale přece jen mimořádně vážnou přírodní katastrofu, začala se zabývat řada odborníků otázkou pravděpodobnosti kosmických srážek, jejich předpovědi a případnou preventivní ochranou před nimi [4]. Celou věc pojal kongres USA natolik vážně, že pověřil dvě pracovní skupiny odborníků vypracováním projektů na včasnou detekci NEO a na možné způsoby k zamezení kosmické srážky v případě včasného rozpoznání konkrétního ohrožení.

Pravděpodobnost kosmické katastrofy

Při řešení tohoto problému je nutno odpovědět na dvě nikterak snadné otázky: Jaká je pravděpodobnost srážek Země s kosmickými tělesy a jaké mohou být následky takové srážky? Země se neustále sráží s malými zrny meziplanetárního prachu a každý den potkává větší či menší meteorická tělesa. Těchto kosmických projektilů dopadne za jeden rok na Zemi, přesněji řečeno do její atmosféry, řádově 10^8 kg. Rozpětí jejich hmotností je 36 řádů, od nepatrných částic o hmotnosti 10^{-21} kg až k hmotnosti malých planetek

nebo jader komet řádu 10^{15} kg. Na obr. 1, převzatém z práce [5], je vynesena počet interplanetárních těles o hmotnosti m a větší, která se srážejí se Zemí v časovém intervalu jednoho roku. Z toho je patrné, že každou sekundu se Země střetává s meteorickým tělískem o hmotnosti nejméně 0,01 kg. Jejich relativní rychlost vzhledem k Zemi závisí na dráhových elementech a pohybuje se v mezích 16 až 72 km s^{-1} . Mají tedy vzhledem k Zemi kinetickou energii v mezích $1,3 \times 10^8$ až $2,6 \times 10^9 \text{ J kg}^{-1}$ (tj. kinetická energie tělesa o hmotnosti 1 kg). Velmi účinnou ochranou je zemská atmosféra, ve které malá meteorická tělíska shoří. Také větší meteority, které dopadnou na zemský povrch, nezpůsobí žádné škody, neboť interakcí s atmosférou ztratí téměř veškerou kinetickou energii. V novější historii bylo zaznamenáno jen několik desítek nevelkých škod na majetku a jedno lehčí zranění, připadajících na vrub dopadu meteoritů o hmotnosti až několik kilogramů. Od roku 1860 do současnosti je známo jen 15 případů, kdy meteorit dopadl v okruhu pěti metrů od nějaké osoby, která si jevu povšimla. Za poslední dvě století je spolehlivě zaznamenáno přibližně 850 pádů meteoritů o hmotnosti až několik set kg, ale celková hmotnost všech takto registrovaných těles je jen 8000 kg, což představuje zanedbatelný zlomek celkového ročního přírůstku meteorické hmoty na naší planetě. Na povrch Země dopadá ročně přibližně 10^5 meteoritů o hmotnosti 10 kg a větších, se zbytkovou kinetickou energií řádu 10^5 J kg^{-1} , tedy dostatečnou k tomu, aby zásah meteoritem mohl způsobit smrtelné zranění. Avšak v moderní historii žádný takový případ nebyl zatím spolehlivě dokumentován. Za předpokladu průměrné populace lidstva 10^9 jedinců v posledních dvou stoletích lze říci, že pravděpodobnost smrti jednotlivce způsobené dopadem malého meteoritu je menší než $10^{-11} \text{ rok}^{-1}$. Avšak tento výsledek je poněkud zavádějící. Pokud vezmeme v úvahu pravděpodobnost dopadu kosmického tělesa velké hmotnosti, pak pravděpodobnost ohrožení jednotlivce kosmickou srážkou je podstatně větší. Počítáme-li s relativní rychlostí těles kategorie NEO v mezích 16 až 72 km s^{-1} , která se průletem atmosférou již podstatně nesníží, pak energie uvolněná při dopadu bude řádu 10^8 až 10^9 J kg^{-1} , což převyšuje o dva až tři řády hodnoty energie uvolněné při vznětu vysoce explozivní látky ($4 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$). Již dopad tělesa o průměru 2 až 3 metrů a hmotnosti 10^4 kg, tedy s energií kolem 10^{12} až 10^{13} J , by mohl způsobit při dopadu do hustě obydlené oblasti znatelné škody.

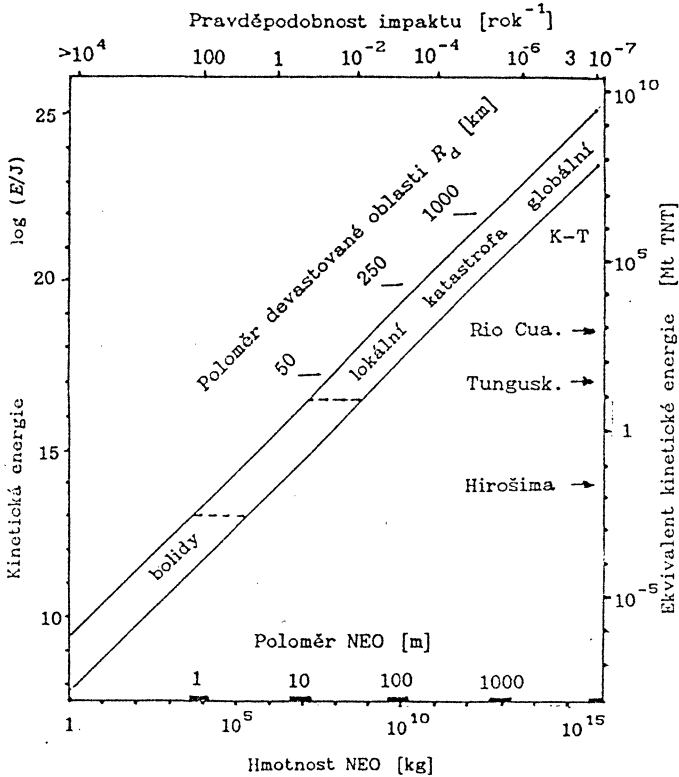


Obr. 1. Počet N interplanetárních těles o hmotnosti m a větší, která se srážejí se Zemí v časovém intervalu jednoho roku. Na grafu převzatém z práce [5] je znázorněna závislost $\log N$ na $\log(m/\text{kg})$. Rozpětí hmotností je 35 řádů, od nepatrných částic o hmotnosti 10^{-20} kg až k hmotnosti malých planetek nebo jader komet řádu 10^{15} kg.

Poněvadž pro úvahy o možných následcích dopadu kosmických těles srovnáváme jejich účinky s výsledky získanými při zkouškách s jadernými výbuchy, používáme pro množství uvolněné energie jednotku megatonu trinitrotoluenu (Mt TNT nebo stručně Mt) a klademe ekvivalent $1 \text{ Mt} = 4,2 \times 10^{15} \text{ J}$. Pro kinetickou energii E (vyjádřenou v Mt) kosmického tělesa dopadajícího na Zemi rychlostí v (vyjádřenou v m s^{-1}) platí

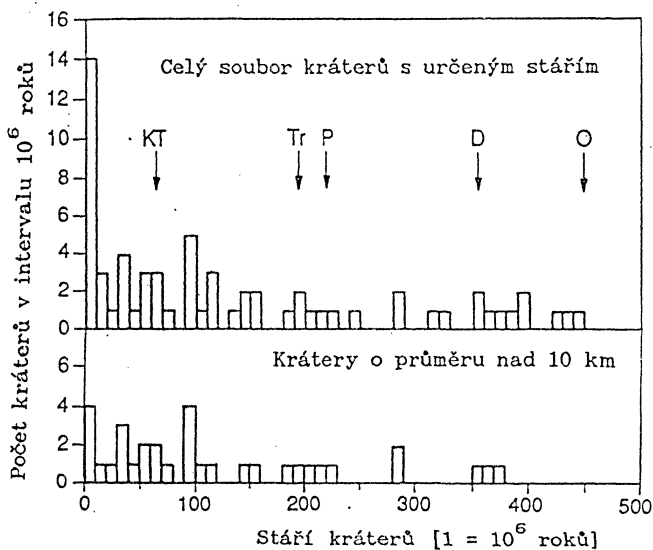
$$E = 5 \times 10^{-16} v^2 R^3 \rho,$$

kde R je poloměr tělesa v metrech a ρ je jeho hustota v mezích 1000 až 5000 kg m^{-3} . Kinetická energie tělesa o hmotnosti řádově 10^5 kg přesahuje hodnotu energie uvolněné



Obr. 2. Graf shrnující některé parametry kosmických těles kategorie NEO. Závislost kinetické energie NEO na jejich hmotnosti v rozmezí rychlosti vzhledem k Zemi $11,2 \text{ km s}^{-1}$ (je vyznačena spodní plnou čarou) až 72 km s^{-1} (horní čára). Silnou krátkou úsečkou nad škálou hmotností je vyznačen poloměr tělesa R v rozmezí hustot 1000 až 3000 kg m^{-3} . Na škále ekvivalentu kinetické energie jsou vyznačeny energie uvolněné při explozi první jaderné zbraně (Hirošima) a některých impaktech: Tunguzský meteorit (nebo malá kometa), Rio Cuarto v Argentině a globální katastrofa na rozhraní křídly a terciéru (K-T). Pravděpodobnost impaktu P [rok^{-1}] je odhadnuta podle vztahu $P = 200 R^{-2,5}$, kde poloměr tělesa je vyjádřen v metrech. Malá tělesa až do hmotnosti 10^5 kg se projevují jako jasné bolidy s velkou ztrátou hmotnosti i kinetické energie při průletu atmosférou. Pokud tělesa v rozmezí hmotnosti 10^6 až 10^8 kg jsou převážně zbytky relativně křehkého materiálu z komet, pak i ta se při průletu atmosférou prakticky vypaří. Skutečné nebezpečí představují impakty těles o hmotnosti nad 10^9 kg .

při výbuchu první atomové bomby v Hirošimě (0,02 Mt). Závislost mezi hmotností, poloměrem a kinetickou energií a dalšími parametry je schématicky znázorněna na obr. 2. Při dopadu planety nebo jádra komety o průměru 5 km a hmotnosti 10^{14} kg nutno počítat s energií řádově 10^7 až 10^8 Mt, což představuje energii uvolněnou při explozi asi 10^5 až 10^6 vodíkových bomb. Následky takové srážky by byly absolutně devastující nejen v místě dopadu, ale znamenalo by to globální katastrofu. Supersonické úderné vlny by měly ničivý účinek do vzdálenosti tisíce kilometrů. Při dopadu do vod oceánu by vznikla mohutná příbojová vlna ničící celá pobřeží. Neméně ničivé by mohly být globální změny klimatu. Materiál vyvržený do zemské atmosféry, jakož i popel z rozsáhlých požárů, by oslabil na delší dobu sluneční záření natolik, že průměrná teplota na zemském povrchu by klesla hluboko pod bod mrazu. Není tedy divu, že v těchto katastrofách globálního charakteru jsou hledány příčiny náhlého zániku brontosaurů a téměř veškerých tehdejších druhů fauny a flóry před 65 miliony let [6]. Tato hypotéza je dosti přesvědčivě podložena nálezem tzv. černé vrstvy v sedimentech vyznačující rozhraní mesozoika a terciaru. V této velmi tenké vrstvě sedimentu je nadměrné množství stabilních izotopů iridia 191 a 193 a byla zde nalezena neobvykle vysoká koncentrace izobutirické aminokyseliny. Kromě toho v některých lokalitách obsahuje tektity vznikající prudkým ochlazením roztavené spršky hornin. To svědčí o tom, že tato vrstva byla výrazně obohacena materiálem mimozemského původu a sama o sobě je sedimentem vzniklým bezprostředně po pádu velkého tělesa.



Obr. 3. Rozdělení stáří impaktních kráterů dosud nalezených na povrchu Země. Krátery o průměru nad 10 km byly vytvořeny dopadem planety nebo jádra větší komety. V horní části histogramu jsou vyznačeny jednotlivé významné etapy geologického vývoje: O=Ordovik, D=Devon, P=Perm, Tr=Trias. KT označuje předěl křídý a třetihor, ve kterém došlo k náhlému vyhynutí brontosaurů připisovanému kosmické katastrofě. Relativně velký počet kráterů ve stáří do 100 milionů roků je výběrový efekt. Starší krátery vymizely v důsledku geologických změn.

Dopady kosmických těles v minulosti zanechaly stopy nejen na Měsíci a řadě dalších těles sluneční soustavy, ale také na zemském povrchu ve formě meteorických neboli impaktních kráterů. Není to jen známý meteorický kráter v Arizoně, ale například též rozsáhlé prolákliny zahrnující krátery Ries a Steinheim. Geologický vývoj Země značný počet nejstarších impaktních kráterů zahladil. Proto stáří těchto útvarů většinou není velké. Impaktních kráterů dosahujících v průměru nejméně 10 km bylo na zemském povrchu zatím identifikováno 33. Je to přibližně čtvrtina všech dosud známých kráterů tohoto druhu, u kterých bylo určeno jejich stáří (viz histogram na obr. 3). Pro devatenáct takových kráterů plyne odhad stáří mezi milionem až sto miliony roků [7], [8]. V průměru připadá jeden kráter na pět milionů let, z čehož by bylo možno odvodit frekvenci, a tedy i pravděpodobnost dopadu planetek nebo komet v současné epoše. Za předpokladu, že známe zatím jen 20 % těchto útvarů, pak dojdeme k závěru, že jedna kolize Země s planetkou nebo jádrem komety nastane v průměru jednou za milion let. Pravděpodobnost dopadu kosmického tělesa na Zemi ovšem stoupá se zmenšující se jeho hmotností, a tedy i jeho rozměrem. Závislost počtu malých těles kategorie NEO na jejich hmotnosti lze odhadnout z výše uvedené práce [5] a z obr. 1. Tuto závislost pro NEO s větší hmotností, které nás především zajímají, lze aproximovat relací

$$N \sim m^{-0,83},$$

z toho lze dále odvodit vztah pro odhad mezi pravděpodobností kosmické srážky P [rok⁻¹] a poloměrem tělesa R [m]

$$P = p \cdot R^{-n}.$$

Pro odhad pravděpodobnosti v tabulce 1 se předpokládá $n = 2,5$ a $p = 200 \text{ rok}^{-1} \text{ m}^n$. To znamená, že dopady těles o poloměru kolem 10 metrů, hmotností řádově 10^7 kg a

Tabulka 1. Některé parametry pro dopad NEO s předpokládanou rychlostí vzhledem k Zemi 30 km s^{-1} a hustotou 1000 kg m^{-3} (Kinetická energie = $4,5 \times 10^8 \text{ J kg}^{-1} = 1,07 \times 10^{-7} \text{ Mt kg}^{-1}$)

Poloměr NEO	Pravděpodobnost dopadu	Energie	Poloměr devastované oblasti
m	rok ⁻¹	Mt	km
10000	$2,0 \times 10^{-8}$	$4,5 \times 10^8$	5300
5000	$1,1 \times 10^{-7}$	$5,6 \times 10^7$	2600
2000	$1,1 \times 10^{-6}$	$3,6 \times 10^6$	1000
1000	$6,3 \times 10^{-6}$	$4,5 \times 10^5$	530
500	$3,6 \times 10^{-6}$	$5,6 \times 10^4$	260
100	$2,0 \times 10^{-3}$	$4,5 \times 10^2$	53
50	$1,1 \times 10^{-2}$	56	26
10	$6,3 \times 10^{-1}$	0,45	(5)

Poznámka: Hodnoty energie se vztahují k rychlosti před vstupem do zemské atmosféry. Tělesa o poloměru 10 m a menší jsou silně bržděna průletem atmosférou a uvolněná energie při případném dopadu na zemský povrch je i o několik řádů menší.

s ekvivalentem kinetické energie 1 Mt lze očekávat nejméně desetkrát za století. Skutečnost, že ve spolehlivých historických pramenech se nezachovaly autentické popisy takovýchto kolizí s většími následky, je svým způsobem záhadou a má zřejmě několik příčin. Jednou z nich je, že až do nedávné doby vyspělejší civilizace existovaly jen na poměrně malém procentu zemského povrchu. Ale i tak je s podivem, že tyto jevy unikly pozornosti. Například nedávno objevené pole řady impaktních kráterů podlouhlého tvaru na Rio Cuarto v Argentíně [9], bylo vytvořeno patrně asteroidem o průměru asi 300 m a hmotnosti přibližně 10^{10} kg. Stáří tohoto kráterového pole nepřesahuje 10000 let. V tomto případě šlo o těleso, které se ještě v atmosféře rozpadlo na několik kusů a ty pak dopadly pod malým úhlem vzhledem k zemskému povrchu. Tím vznikly „rýhy“ o šířce 2 km a délce až 30 km. Šlo tedy o „tečný“ impakt, který není vzácností. Pro kosmické srážky účinný průřez planety S je obecně větší než průřez geometrický a je závislý na relativní rychlosti v „projektilu“ — tedy například meteoritu — vzhledem k planetě, podle vztahu

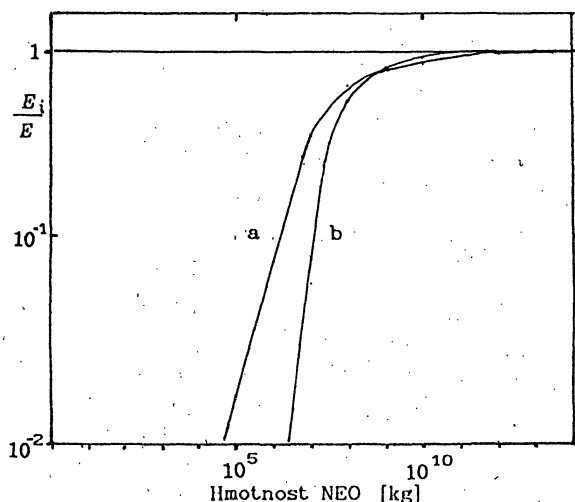
$$S = \pi(R_z^2 + 2GM_z R_z v^{-2}),$$

kde G je gravitační konstanta, R_z poloměr planety (v našem případě poloměr Země), M_z její hmotnost. Při rychlosti $v = 30 \text{ km s}^{-1}$ je účinný průřez Země o faktor 1,3 větší než průřez geometrický. To znamená, že nejméně 23 % impaktů se uskuteční pod malým „tečným“ úhlem a jejich dráha v atmosféře může snadno dosáhnout mnoha set kilometrů. Jde tedy o nápadný jev pozorovatelný z rozsáhlého území. Je jisté, že další příčinou nedostatku informací o těchto jevech je, že pravděpodobnost dopadu kosmického tělesa do vod oceánu je větší, v poměru 2 : 1, než pravděpodobnost dopadu na pevninu. Avšak hlavní příčinou téměř úplné absence záznamů o dopadech s ekvivalentní energií v rozmezí 0,1 až 1 Mt je ochranný brzdící účinek zemské atmosféry. Kosmické těleso se při průletu zemskou atmosférou zahřívá, dochází k odpařování (ablaci) jeho vnějších vrstev, a tak ztrácí jak hmotnost, tak i kinetickou energii. Jestliže počáteční rychlost tělesa při vstupu do atmosféry v okamžiku, kdy započala jeho ablace, je v_a a rychlost při dopadu na zemský povrch je v_i , pak pro poměr konečné hmotnosti tělesa m_i k hmotnosti počáteční platí vztah

$$m_i/m_k = \exp[\eta(v_i^2 - v_a^2)],$$

kde η je ablační koeficient, který pro kamenné meteority má hodnotu $0,007 \text{ s}^2 \text{ km}^{-2}$, pro chondritické meteority 0,02 a pro relativně křehký kometární materiál je asi 0,04. Jestliže pro jádro velmi malé komety o hmotnosti řádově 10^8 kg předpokládáme počáteční rychlost $v_a = 30 \text{ km s}^{-1}$ a konečnou $v_i = 3 \text{ km s}^{-1}$, pak poměr konečné hmotnosti k počáteční je řádově 10^{-16} , tedy veškerá hmota takovéto „minikometry“ se při průletu vypaří. V případě kamenného meteoritu s toutéž hmotností a rychlostí by poměr konečné a počáteční hmotností byl řádově 0,001, tedy na zemský povrch by dopadl zbytek o hmotnosti 10^5 kg s kinetickou energií o pět řádů nižší ve srovnání s hodnotou energie počáteční! Na obr. 4 je znázorněn průběh poměru počáteční a konečné kinetické energie přepočtené na 1 kg pro počáteční hmotnosti tělesa. Z toho grafu je patrné, že tělesa kategorie NEO až do hmotnosti 10^5 kg lze z dalších úvah vyloučit. Jestliže by tělesa typu NEO o hmotnostech 10^6 až 10^8 kg byla převážně

kometárního charakteru, pak i ta možno označit jako tělesa neškodná a pravděpodobnost vzniku lokální katastrofy by se zdatelně snížila. Z těchto úvah plyne, že vážné nebezpečí znamenají NEO s hmotností 10^9 kg a větší. Pak ovšem pravděpodobnost impaktu s výraznějšími následky nebude větší než 10^{-3} rok $^{-1}$. Snad proto chybějí v kronikách záznamy o kosmických srážkách. Nejlépe popsaná a prostudovaná událost dopadu pravděpodobně malého jádra komety je až z počátku tohoto století, kdy 30. června roku 1908 byl pozorován pád tzv. tunguzského meteoru s ničivými následky na velké ploše v sibiřské tajze. Množství uvolněné energie při tomto jevu se odhaduje na ekvivalent 40–50 megatun TNT. Nepochybně to byl jev s ničivými následky v oblasti 2000 km 2 , lze však mluvit jen o lokální katastrofě.



Obr. 4. Poměr kinetické energie přepočtené na 1 kg hmotnosti tělesa při vstupu do zemské atmosféry E a při dopadu na zemský povrch E_i . Křivka a je pro tělesa s původní rychlostí 15 km s $^{-1}$, křivka b pro rychlosti 30 km s $^{-1}$.

Rozsah kosmické katastrofy

Rozsah oblasti, která dopadem kosmického tělesa bude devastována, závisí nejen na množství uvolněné energie, ale na řadě dalších faktorů, především na tom, zda k explozi dojde až na zemském povrchu, nebo ve středních či vyšších vrstvách zemské atmosféry. Obecně platí, že poloměr R_d postižené oblasti roste s třetí odmocninou uvolněné energie. Z pokusů s jadernými výbuchy bylo odvozena řada empirických vztahů. Jeden z nejjednodušších je možno napsat ve tvaru

$$R_d = a_d E^{1/3},$$

kde E je energie vyjádřená v Mt a koeficient $a_d = 6,9 \text{ Mt}^{-1/3} \text{ km}$, poloměr R_d je vyjádřen v km. Podle tohoto vztahu je počítán poloměr devastované oblasti v tabulce 1. V jiném obdobném vztahu převzatém z [10] se bere v úvahu i výška h (v kilometrech) exploze nad zemským povrchem

$$R_d = aE^{1/3} + bh - ch^2/E^{1/3},$$

kde $a = 5,08 \text{ Mt}^{-1/3} \text{ km}$, $b = 2,09$, $c = 0,445 \text{ Mt}^{1/3} \text{ km}^{-1}$. Poloměr ničivého účinku R_d je vzdálenost od epicentra exploze, ve které tlaková vlna ještě vyvolá destrukční tlak přibližně 30 kPa. Lze ukázat, že pokud by se energie kosmického tělesa plně uvolnila v atmosféře ve výšce nad deset km, pak až do energie 2 Mt by škody byly poměrně malé. Z toho opět plyne, že tělesa o rozměrech do 20 m a hmotnosti do 10^7 kg, pokud explodují ve výškách nad 20 km, mohou v krajním případě i uniknout pozornosti. Nutno ovšem připomenout, že v obou případech jde o poněkud spornou extrapolaci empirických vzorců odvozených pro poměrně nízké energie. Proto údaje o rozsahu zničené oblasti pro energie nad 10 Mt mají spíše jen orientační význam. Nicméně je zřejmé, že až do škod způsobených dopadem tělesa o rozměrech asi 100 až 200 metrů, s energií asi 5×10^2 Mt, možno mluvit jen o lokální katastrofě na území o rozloze asi 8000 km². Ta by si vyžádala v hustěji obydlených oblastech řádově milion lidských obětí. Ale již dopad relativně malé komety nebo planetky o poloměru 1 km a hmotnosti 10^{13} kg by znamenal globální katastrofu. Bezprostřední počet obětí by nemusel překročit 20 % současné populace na Zemi, avšak katastrofální by byly následné procesy, které mohou fatálně ohrozit celosvětovou populaci. Jestliže pravděpodobnost dopadu relativně velkého tělesa kategorie NEO je $3 \times 10^{-7} \text{ rok}^{-1}$, pak při průměrné délce lidského věku 70 let je pravděpodobnost asi 10^{-5} , že nás zastihne velká globální kosmická katastrofa během našeho života. Je to pravděpodobnost velmi malá, ale rozhodně není zanedbatelná. Dostáváme se k paradoxnímu závěru, že nebezpečí smrti způsobené kosmickou katastrofou pro každého z nás je potenciálně větší než nebezpečí letecké nehody.

Druhotné následky kosmické katastrofy

Devastující účinek dopadu NEO by byl jen z části způsoben drtivou rázovou vlnou. Současně s ní by se šířila tepelná vlna následující po intenzivním tepelném záření z epicentra dopadu. Rozsáhlé požáry by zachvátily velké oblasti a znamenaly by citelný úbytek atmosférického kyslíku a zvýšení koncentrace CO a CO₂. Mezi další závažné následné procesy, které možno po dopadu NEO očekávat, je oslabení slunečního záření rozptýleným prachem v zemské atmosféře. Za zcela přijatelného předpokladu, že do středních vrstev atmosféry se rozptýlí nejméně 10 % hmoty komety ve formě prachových částic o rozměrech řádově mikrometru, pak zvýšení opacity čili optické tloušťky zemské atmosféry může vyvolat dočasný pokles průměrné teploty při zemském povrchu. Optická tloušťka τ je v takovém případě dána vztahem

$$\tau = N_d \pi a_d^2 Q,$$

kde N_d je počet částic ve sloupci atmosféry o základně 1 m, a_d je poloměr částice a Q je poměr geometrického a opticky účinného průřezu částice. Pro částice s poloměrem 10^{-6} m je $Q \simeq 2$ a optická tloušťka je

$$\tau = 6,3 \times 10^{-12} M_d / A m_d,$$

kde $A = 5,1 \times 10^{14} \text{ m}^2$ je rozloha zemského povrchu, m_d hmotnost jedné částice a M_d hmotnost rozptýleného prachu v ovzduší, tedy

$$N_d = 1,96 \times 10^{-15} M_d/m_d.$$

Protože

$$m_d = 4\pi a_d^3 \rho / 3,$$

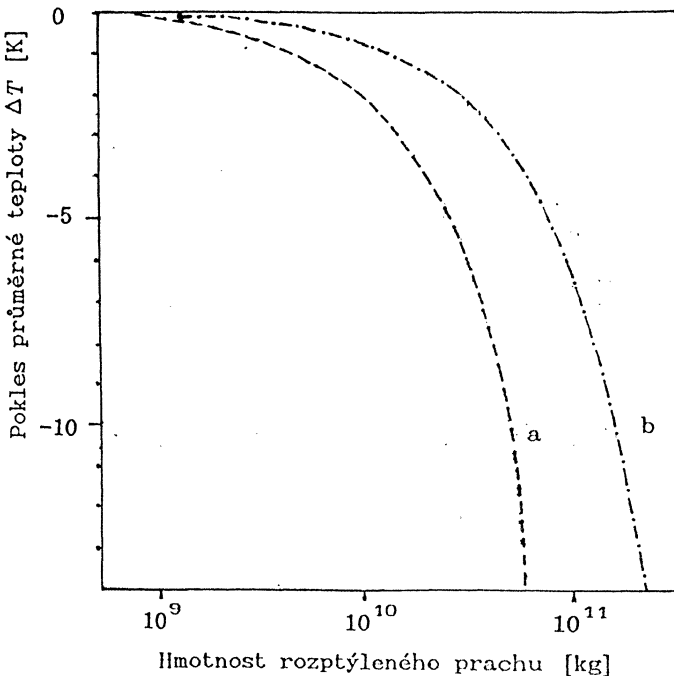
kde ρ je hustota materiálu, ze kterého jsou částice tvořeny (v mezích 1000 až 3000 kg m^{-3}), pak platí

$$\tau = 3,705 \times 10^{-26} M_d (4\pi a_d^3 \rho)^{-1} = 2,93 \times 10^{-9} M_d / \rho.$$

Poněvadž teplota se mění se čtvrtou odmocninou dopadající energie, lze pro pokles teploty ΔT v prvním přiblížení použít vztah

$$\Delta T = T_0 (e^{-0,25\tau} - 1),$$

kde $T_0 \simeq 285 \text{ K}$ je průměrná teplota přízemních vrstev zemské atmosféry. Pokles teploty v závislosti na hmotnosti rozptýleného prachu je znázorněn na obr. 5. Je zřejmé, že znatelný pokles teploty lze očekávat již při hmotnosti $5 \times 10^{10} \text{ kg}$ rozptýleného prachu, pokud by se udržel po delší dobu v atmosféře. Z toho plyne, že dopad jádra komety nebo malé planetky o hmotnosti 10^{13} kg , tedy o řád menší než jádro Halleyovy komety, by snadno mohl vyvolat „kosmickou“ zimu s neblahými důsledky pro vegetaci.



Obr. 5. Globální pokles průměrné teploty přízemní vrstvy ovzduší v závislosti na množství rozptýleného prachu po dopadu kosmického tělesa. Křivka *a* je pro prachové částice o poloměru 10^{-6} m , přičemž hustota materiálu, ze kterého jsou tvořeny, je 1000 kg m^{-3} , křivka *b* je pro částice téhož rozměru, ale hustoty 3000 kg m^{-3} .

Tabulka 2. Hmotnost m_z a objem V vyvrženého materiálu při dopadu tělesa s kinetickou energií E , poloměr r a ekvivalentní hloubka h krátery

E (Mt)	m_z (kg)	V (m ³)	r (km)	h (m)
10^8	$3,64 \times 10^{16}$	$1,21 \times 10^{13}$	278	50
10^7	$4,58 \times 10^{15}$	$1,52 \times 10^{12}$	105	44
10^6	$5,77 \times 10^{14}$	$1,92 \times 10^{11}$	40	38
10^5	$7,26 \times 10^{13}$	$2,42 \times 10^{10}$	16	31
10^4	$9,14 \times 10^{12}$	$3,04 \times 10^9$	6,2	25
10^3	$1,15 \times 10^{12}$	$3,84 \times 10^8$	2,6	19
10^2	$1,45 \times 10^{11}$	$4,82 \times 10^7$	1,1	13
10^1	$1,82 \times 10^{10}$	$6,07 \times 10^6$	0,6	6
10^0	$2,31 \times 10^9$	$7,72 \times 10^5$	0,3	2

Poznámka: Objem je počítán za předpokladu hustoty materiálu 3000 kg m^{-3} . Ekvivalentní hloubka h je dána vztahem $h = V/(\pi r^2)$, kde poloměr krátery r je vyjádřen v metrech. Ekvivalentní hloubka h není skutečná hloubka krátery, ale naznačuje, že impaktní krátery jsou relativně mělké.

Za předpokladu rychlosti tělesa 29 km s^{-1} platí pro jeho hmotnost $M_k \equiv 10^7 E$, pak hmotnost z krátery vyvrženého materiálu je téměř o dva řády větší než hmotnost dopadajícího tělesa!

Avšak k rozptýlenému materiálu z jádra komety nutno připočíst i prachové částice z vyvrženého materiálu zemského povrchu. Jaké bude jeho množství lze jen přibližně odhadnout extrapolací empirických vztahů odvozených z nukleárních pokusů. Jestliže m_z je celková hmotnost vyjádřená v kg vyvrženého materiálu z impaktního krátery vyhloubeného explozí o celkové energii E (vyjádřenou v Mt), lze pro odhad m_z použít vztahu

$$m_z = \alpha^2 E^\beta,$$

kde $\beta = 0,9$ a koeficient α různí autoři uvádějí v mezích 4×10^4 do $1,6 \times 10^5 \text{ kg}^{(1-\beta)/2} \text{ Mt}^{-\beta}$. V tabulce 2 jsou uvedeny některé parametry pro vyvrženou hmotu z impaktního krátery za předpokladu

$$\alpha = 4,8 \times 10^4 \text{ kg}^{(1-\beta)/2} \text{ Mt}^{-\beta}.$$

Celková hmotnost vyvrženého materiálu převyšuje nejméně o řád hmotnost kosmického tělesa, které svým dopadem kráter vyhloubilo (viz tabulku 2). Jestliže jen 1 % vyvrženého materiálu bude ve formě submikronových prachových částic, pak dopad asteroidu nebo komety o hmotnosti 10^{11} kg , tedy tělesa o rozměrech řádově 0,5 km, může vyvolat poměrně výrazný globální pokles průměrné teploty, a to po dobu řádově rok. Nutno však poznamenat, že přesnější popis průběhu teplotních poměrů na Zemi po dopadu tělesa kategorie NEO by byl poněkud komplikovanější. Jestliže by došlo k výraznému zvýšení koncentrace CO_2 , pak bychom mohli očekávat poměrně dlouhou přetrvávající skleníkový efekt, a tím i zvýšení průměrné teploty po relativně drastické „kosmické“ zimě.

Dalším katastrofálním procesem po dopadu NEO by mohla být kontaminace atmosféry i vody produkty chemických reakcí, které by mohly snadno proběhnout v poměrně velké oblasti kolem místa dopadu [11]. Teplota atmosféry a vypařeného

Tabulka 3. Koeficient kontaminace zemské atmosféry (A) nebo vod oceánů (O) materiálem z kometárního jádra $k_i = x_i/M_a$

Atom	x_i	(A)	k_i (kg^{-1})	(O)
-	1,00	$2,0 \times 10^{-19}$		$7,1 \times 10^{-22}$
H	0,12	$2,4 \times 10^{-20}$		$8,5 \times 10^{-23}$
C	0,18	$3,6 \times 10^{-20}$		$1,3 \times 10^{-22}$
N	0,02	$4,0 \times 10^{-21}$		$1,4 \times 10^{-23}$
O	0,47	$9,4 \times 10^{-20}$		$3,3 \times 10^{-22}$
Na	0,003	$6,0 \times 10^{-22}$		$2,1 \times 10^{-24}$
S	0,033	$6,6 \times 10^{-21}$		$2,3 \times 10^{-23}$

x je relativní zastoupení daného prvku v jádru komety, $M_a = 5,1 \times 10^{18}$ kg resp. $1,4 \times 10^{21}$ kg je hmotnost zemské atmosféry nebo hmotnost vod oceánů.

materiálu v epicentru exploze by snadno dosáhla hodnot až 2×10^4 K a značné množství plynu by bylo ionizováno. Při následném ochlazování a rekombinaci mohlo by snadno docházet k celé řadě chemických reakcí, při kterých by například rozptýlený prach mohl hrát úlohu katalyzátoru. Především by mohlo vzniknout značné množství oxidů dusíku přímou reakcí v zemské atmosféře. Při dopadu komety vzhledem k chemickému složení kometárních jader by se podstatně zvýšil obsah CO a patrně i SO₂. Do jaké míry může být zemská atmosféra nebo vody oceánu kontaminovány jednotlivými prvky obsaženými v jádru komety lze vyčíslit pomocí koeficientu kontaminace. Koeficient kontaminace k_i zemské atmosféry (nebo vod oceánů) prvkem nebo sloučeninou i obsaženou v materiálu komety, udává míru kontaminace daného prostředí daným prvkem nebo sloučeninou při dopadu materiálu z jádra komety o hmotnosti 1 kg; lze jej definovat vztahem

$$k_i = x_i/M_a,$$

kde x_i je relativní zastoupení prvku i v jádru komety a $M_a = 5,1 \times 10^{18}$ kg je hmotnost zemské atmosféry nebo vod oceánů ($1,4 \times 10^{21}$ kg). Hodnoty koeficientu kontaminace, který má rozměr kg^{-1} , jsou uvedeny v tabulce 3. Globální kontaminace příslušného zemského prostředí (atmosféry nebo vod oceánů) jádrem komety o hmotnosti M_k je dána vztahem

$$C_i = k_i M_k / A_i,$$

kde A_i je průměrné přirozené relativní zastoupení příslušného prvku nebo sloučeniny v zemské atmosféře. Hodnota kontaminace je funkcí nejen času, ale i rychlosti, s jakou se kontaminace rozšiřuje, tedy $C_i \equiv C_i(t)$ podle vztahu

$$C_i(t) = M_k k_i A_i^{-1} (2,55 \times 10^4 \text{ km}/D)^2 (1 + v_z t/D)^2 \exp(-t/t_0),$$

kde D je počáteční průměr zasažené oblasti, v_z je rychlost rozšiřování kontaminace a t_0 je doba života produktu chemické reakce. V tabulce 4 je uveden odhad relativního zvýšení hmotnosti CO, CO₂ a SO₂ po dopadu jádra komety o hmotnosti 10^{14} kg. Předpokládá se, že chemicky reaguje pouze kometární materiál s atmosférickým kyslíkem.

Tabulka 4. Globální a lokální kontaminace zemské atmosféry po dopadu komety o hmotnosti 10^{14} kg.

Molekula	A_i	Globální C_i	Lokální*) C_i
CO	6×10^{-6}	0,6	100
CO ₂	$1,45 \times 10^{-2}$	$2,5 \times 10^{-4}$	0,04
SO ₂	6×10^{-8}	11	1800

*) Lokální kontaminace je pro oblast o průměru 2000 km.

Lokální kontaminace troposféry SO₂ v oblasti o průměru D až 1000 km by snadno mohla dosáhnout tisícnásobné průměrné hodnoty. Jaké další důsledky by to mělo, lze snadno odhadnout ze známých účinků kyselých dešťů. Mnohem závažnější by byla kontaminace životního prostředí produkty chemických reakcí vlastního povrchového materiálu vyvrženého do atmosféry. Vysoká teplota a možné katalytické účinky prachových částic mohou vésti ke vzniku velkého množství různých relativně stabilních oxidů. Podstatný úbytek atmosférického kyslíku by vedl k nedokonalému spalování při rozsáhlých požárech a k nadměrné lokální koncentraci toxického CO. Biologická rovnováha by se dramaticky porušila. S velkou pravděpodobností by například došlo k nadměrnému přemnožení některých druhů hmyzu. Důsledky globální katastrofy na civilizaci by nepochybně byly velmi drastické, ale nemusely by nutně vyústit v její definitivní zánik.

Lze odvrátit kosmickou katastrofu ?

Je nesporné, že srážka naší planety s větším kosmickým tělesem by znamenala přírodní katastrofu nesrovnatelného rozsahu. I velmi silná zemětřesení, při kterých se uvolní energie řádově 10^{19} J, což je srovnatelné s impaktem NEO s ekvivalentem energie 2000 Mt TNT, nemají tak dramatické následky, jaké možno očekávat v případě energeticky ekvivalentní kosmické katastrofy. Je zde však významný rozdíl mezi těmito katastrofickými jevy. Okamžik, kdy nastane zemětřesení, nelze zatím předpovědět, naproti tomu čas a místo srážky Země s kosmickým tělesem by bylo možno za jistých okolností určit se značnou přesností a s velkým předstihem. Tato skutečnost ovšem nabádá k tomu, abychom uvažovali o možných způsobech, jak nebezpečí kosmické katastrofy odvrátit.

Tělesa kategorie NEO, která mohou Zemi ohrozit, možno rozdělit do čtyř skupin:

1. Známé asteroidy nebo periodické komety, jejichž dráhové elementy jsou — i s ohledem na rušivé účinky planet — určeny s vysokou přesností a lze je průběžně sledovat. Jejich možnou kolizi se Zemí lze výpočtem předpovědět s předstihem desetiletí až století. V takovém případě by bylo možno hrozící nebezpečí poměrně snadno odvrátit prostředky, které jsou dnes k dispozici. K tomu nutno poznamenat, že zatím žádný známý asteroid ani periodická kometa v této skupině nás v příštím století neohroží.

2. Nově objevené asteroidy nebo periodické komety, u kterých předběžné určení jejich drah indikuje kritické přiblížení k Zemi v časovém horizontu jednoho až několika let. V takovém případě téměř jisté odvrácení katastrofy by bylo možné s nasazením náročnějších, ale dnes již technicky realizovatelných prostředků.

3. Nově objevená tělesa, která v době objevu by byla již na úseku dráhy směřujícím k místu střetu se Zemí v časovém horizontu týdnů až měsíců. Odvrácení katastrofy by bylo možné, avšak se značnou pravděpodobností neúspěchu.

4. Dosud neobjevená, a tedy neznámá tělesa, například neperiodická kometa, která by na Zemi dopadla zcela neočekávaně. Odvrácení katastrofy je pochopitelně v takovém případě zcela vyloučeno.

Scénář odvrácení kosmické katastrofy je založen na obecně známé filozofii: Nepřítele nutno vyhledat, identifikovat, sledovat jeho pohyby a pokusit se ho zneškodnit. Při vyhledávání potenciálně nebezpečných těles kategorie NEO jsme zatím odkázáni na systematické přehledky oblohy prováděnými pozemskými dalekohledy ve viditelném oboru spektra. Detekce radarovou nebo laserovou metodou zatím není realizovatelná. Avšak i klasické optické metody jsou dnes již mnohem efektivnější díky snímání obrazu pomocí CCD (Charged-Coupled-Device) s následným počítačovým zpracováním dat. Tak lze objevit a sledovat co do jasnosti velmi slabé objekty. Zdánlivá jasnost jádra komety nebo asteroidu o poloměru R_k (km) ve vizuálním oboru spektra, vyjádřená ve hvězdných magnitudách V je dána vztahem

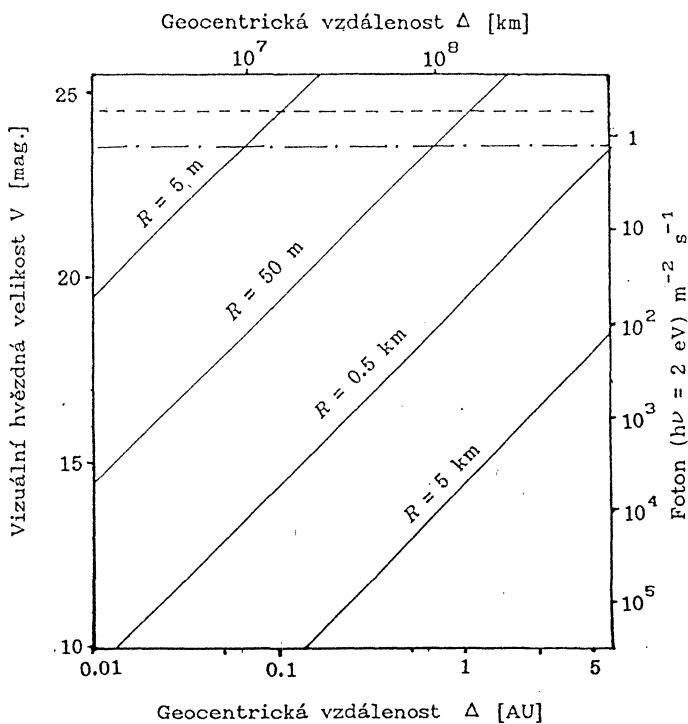
$$V = 14,2 + 5[\log(\Delta/\text{AU}) + \log(r_h/\text{AU}) - \log(R_k/\text{km}) - 0,5 \log B],$$

kde Δ a r_h jsou geocentrické a heliocentrické vzdálenosti (vyjádřené v astronomických jednotkách AU) a bezrozměrný faktor B je součin albeda (tj. odrazivosti povrchu tělesa) A_1 a fázové funkce f , tedy

$$B = fA_1 = 0,5(1 + \cos \Phi)A_1 \leq 1,$$

kde Φ je fázový úhel (pro $\Phi = 0^\circ$ je objekt pro pozorovatele v „úplňku“). V grafu na obr. 6 je znázorněna závislost zdánlivé magnitudy V pro tělesa o poloměru $R_k = 5,50$ metrů a 0,5 a 5 km, s albedem 0,06, fázovou funkcí $f = 0,5$, v heliocentrické vzdálenosti $r_h = 1$ AU, na vzdálenosti geocentrické. Mezní magnituda slabých, ale potenciálně objevitelných objektů, je dána plošným jasnem pozadí noční oblohy, který i vně zemské atmosféry lze vyjádřit jasnem hvězdy $V = 24,5$ magnitudy na ploše jedné čtverečné vteřiny, což odpovídá přibližně toku jednoho fotonu (s energií 2 eV) $\text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$. Aby byl objekt na pozadí oblohy zjištělný, musí jeho zdánlivá jasnost odpovídat minimálně toku 3 fotonů $\text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$, což odpovídá jasu $V = 23$ magnitudy. Z grafu na obr. 6 je ihned zřejmé, že objevitelná v dostatečné vzdálenosti od Země, tj. minimálně v geocentrické vzdálenosti $\Delta \geq 0,1$ AU, jsou tělesa o poloměru 50 m a větší. To znamená, že s nezbytným předstihem mohou být objevena tělesa o hmotnosti $M_k \geq 5 \times 10^8$ kg a kinetickou energií $E \geq 40$ Mt, u kterých pravděpodobnost impaktu je 10^{-2} za rok a menší. Jestliže malá tělesa s hmotností 10^5 až 10^8 kg, která prakticky zůstanou

neobjevena, jsou převážně křehké a téměř neškodné zbytky komet, pak jisté omezení současné observační techniky není podstatné. Rozhodující je, že mohou být relativně snadno objevena větší, a tedy potenciálně skutečně nebezpečná tělesa v kategorii NEO. V současné době jsou realizovány čtyři projekty zaměřené na vyhledávání slabých planetek a komet se zřetelem na NEO. Je to jednak již zmíněný program Spacewatch na observatoři Kitt Peak v Arizoně. Průměrný úlovek byl zde zatím asi 15 NEO za rok. Avšak technickým zdokonalením projektu lze objevit až 200 dosud neznámých objektů ročně. Další dva programy běží již řadu let na observatoři Mt. Palomar v Kalifornii. Jde o klasické vyhledávání planetek a komet fotografickou metodou pomocí velkých Schmidových komor. Projekt „Planet-Crossing-Asteroid-Survey“ vede dr. Helinová a program nazvaný „Palomar and Asteroid and Comet Survey“ realizují manželé Shoemakerovi. V Austrálii se nedávno rozeběhl program „Anglo-Australian Near-Earth-Asteroid Survey“. V průběhu příštích 20 let bude tak nalezeno 3000 až 4000 dosud neznámých malých těles sluneční soustavy, z nichž některé by mohly vážněji ohrozit naši planetu. I když dosti vysoké procento (pesimistický odhad je až 95 %) potenciálně nebezpečných malých planetek a komet zůstane neobjeveno, lze doufat, že budou nalezeny a sledovány v co největším počtu ty největší, a tedy nejnebezpečnější z nich.



Obr. 6. Zdánlivá jasnost těles NEO o poloměru 5 a 50 metrů a 0,5 a 5 km v závislosti na geocentrické vzdálenosti. Je předpokládána hodnota albeda 0,06 a fázové funkce 0,5. Přerušované čáry značí jas pozadí oblohy (24,5 mag.) a limitní magnitudy potenciálně objevitelných těles (23 mag.).

Aktivní metody k zamezení kosmické katastrofy

Jestliže známe s dostatečným předstihem budoucí dráhu potenciálně nebezpečného kosmického tělesa je možné zvolit dva způsoby k odvrácení hrozící kosmické katastrofy: a) změnit jeho dráhu, b) zničit ho explozí. V daleké budoucnosti se nabízí i třetí metoda, metoda jakési kosmické archy Noemovy — totiž evakuace části populace do kosmického prostoru. To je však spíše námět pro science fiction. Z obou výše uvedených a dnešními prostředky proveditelných způsobů je optimální první z nich, totiž změna dráhy tělesa. Tu lze vyvolat zpomalením nebo zrychlením tělesa v jeho dráze vzhledem ke Slunci, tedy vyvoláním jisté poruchy působící například kolmo k okamžitému směru pohybu. Pro zjednodušení předpokládejme, že objekt kategorie NEO se pohybuje po kruhové dráze velmi blízké dráze Země. Pak porucha, která vyvolá složku rychlosti Δv kolmo ke kruhové dráze, má za následek, že těleso bude oscilovat kolem původní dráhy s amplitudou

$$\delta = \frac{\Delta v}{v_0} a,$$

kde v je rychlost v kruhové dráze s poloosou a . Aby těleso minulo v určitém místě své dráhy Zemí, musí být amplituda δ rovna minimální poloměru Země R_z . Za předpokladu, že $a = 1$ AU, pak $v_0 = 30 \text{ km s}^{-1}$. Protože $\delta \geq R_z = 6378 \text{ km}$, pro minimum Δv dostáváme

$$\Delta v \geq v_0 R_z a^{-1} = 1,3 \text{ m s}^{-1},$$

ovšem perioda oscilací je v tomto případě rok. Jestliže bychom chtěli dosáhnout odchylky δ v čase t mnohem kratším než 1 rok, pak z jednoduché linearizace úlohy plyne, že

$$\delta = R_0 \geq \Delta v t,$$

a tedy

$$\Delta v \geq R_0 t^{-1} = 74 \text{ m s}^{-1} (t_0/t),$$

kde $t_0 = 86400 \text{ s} = 1$ den.

Jestliže složka Δv je poruchou vyvolána paralelně s pohybem v dráze, pak vznikne složka rychlosti $\Delta v'$ působící v opačném směru, která bude v případě téměř kruhové dráhy

$$\Delta v' = -3 \Delta v$$

a obdobně jako v předešlém případě

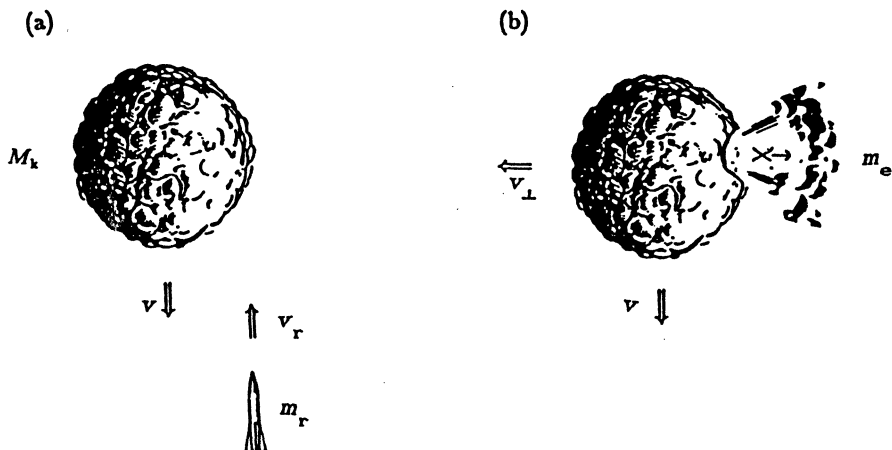
$$\delta = 3 \Delta v,$$

a tedy

$$\Delta v \geq R_0/3t = 0,07 \text{ m s}^{-1} (t_0/t),$$

kde $t_0 = 3,15576 \times 10^7 \text{ s} = 1$ rok. Jestliže bude těleso odchyleno ze své dráhy 10 roků před předpokládaným střetem se Zemí, pak postačí změna rychlosti ve dráze

jen 1 cm s^{-1} , aby se zabránilo katastrofě. V případě, že se bude objekt pohybovat po výstředné dráze s excentricitou 0,5 a porucha bude vyvolána v době průchodu přísluním, pak postačí změna rychlosti jen asi $0,6 \text{ cm s}^{-1}$.



Obr. 7. Princip manévru ke změně dráhy planetky nebo jádra komety.

a) Ke kosmickému tělesu s hmotností M_k a relativní rychlostí vzhledem k Zemi v se vyšle kosmická střela s hmotností m_r a rychlostí v_r .

b) Kosmická střela se střetne s tělesem a vyvolá explozi, která vyvrhne z „boku“ tělesa materiál o hmotnosti $m_e \simeq 0,1 M_k$ a rychlostí řádově $0,1 \text{ m s}^{-1}$. To vyvolá složku rychlosti Δv .

Jednoduchý princip vyvolání potřebného impulsu ke změně rychlosti je naznačen na obr. 7. Meziplanetární střela o hmotnosti m_r se pohybuje rychlostí v_r k planetce nebo jádru komety o hmotnosti M_k pohybující se rychlostí v vstříc meziplanetární střele. Vhodným manévrem je střela navedena na „bok“ tělesa, kde dojde ke kolizi a explozí je vyvržena část hmoty tělesa do prostoru. Tím je udělena tělesu složka rychlosti Δv v opačném směru. Jestliže například výsledná relativní rychlost střely vzhledem k tělesu je 50 km s^{-1} , pak její kinetická energie je $1,25 \times 10^9 \text{ J kg}^{-1}$. To znamená, že při hmotnosti střely $m_r = 3400 \text{ kg}$ se při střetu s tělesem uvolní ekvivalent energie 1 kilotony TNT, což by stačilo, aby například z planetky o průměru 80 m a hmotnosti 10^9 kg bylo vyvrženo 10^8 kg hmoty rychlostí řádově $0,1 \text{ m s}^{-1}$. Tím by vznikla potřebná složka rychlosti $\Delta v \simeq 0,01 \text{ m s}^{-1}$ v opačném směru. K odchýlení kosmického tělesa této hmotnosti na bezpečnou dráhu by tedy stačila nevelká kosmická střela o hmotnosti 3 až 4 tuny bez jakékoli explozivní nálože. Podmínkou ovšem je, že by toto těleso bylo objeveno několik let před předpokládaným dopadem na Zemi. Pro odchýlení větších těles o průměru 1 km a hmotností řádově 10^{12} kg nelze tuto metodu použít. Hmotnost kosmické střely je limitována, právě tak jako její rychlost, neboť podle raketové rovnice platí

$$v_r = g I_{sp} \ln(m_i/m_r),$$

kde g je gravitační zrychlení, I_{sp} je tzv. specifický impuls udělený během činnosti motorů raket a m_i je počáteční hmotnost rakety. Pro nejvýkonnější chemická raketová

paliva je $I_{sp} \simeq 500$ s a optimální poměr $m_i/m_r \simeq 10$. Pokud by byla střela vypuštěna ze startovací dráhy již jako družice Země, pak poměr hmotností by byl prakticky poloviční, ale je pochopitelné, že počáteční hmotnost by nemohla překročit několik tisíc tun. Je tedy zřejmé, že by bylo nutno použít k odchýlení velmi hmotného tělesa kosmických střel s relativně malou hmotností, ale s nukleární náloží. 1 kg nukleární nálože uvolní ekvivalent energie přibližně 1 kilotony TNT. Střela s 420 kg nukleární nálože představuje již 0,4 Mt energie, použitelné k změně dráhy nebezpečného NEO. Nukleárních náloží by bylo možno použít i jako raketového paliva, a tím by se mohla snadno dosáhnout konečná rychlost kosmické střely 800 až 850 km s⁻¹. To by mělo význam především v případě, že kosmické těleso kategorie NEO pohybuje se na přímé dráze do místa střetu se Zemí, by bylo objeveno jen několik dnů před kritickým okamžikem. Jestliže rychlost takového NEO objeveného ve vzdálenosti r_n je v_n a rychlost střely v_r , pak vzdálenost, ve které dostihne střela NEO, bude za zjednodušeného předpokladu

$$r_r = r_n (1 - v_n / (v_n + v_r)).$$

Za předpokladu běžné kosmické techniky by bylo $v_n \simeq 2,5v_r$, a tedy $r_r \simeq 0,29r_n$. Při použití nukleárního paliva by $v_r \simeq 33v_n$, a tedy

$$r_r = r_n v_r / (v_n + v_r) \simeq 0,97r_n.$$

Těleso objevené ve vzdálenosti 0,01 AU = $1,5 \times 10^6$ km na přímé trajektorii k Zemi by ji dostihlo za 15 až 20 hodin. Kosmická střela vypuštěná pomocí nukleárního paliva by toto těleso mohla dostihnout za 30 až 40 minut.

Nukleárních náloží by bylo nutno použít tehdy, jestliže by bylo výhodnější těleso zničit než změnit jeho dráhu. K rozprášení balvanu o průměru 35 m je zapotřebí přibližně 1 kilotona TNT. Extrapolací dostáváme hodnoty 3 Mt a 3000 Mt energie potřebné k destrukci planetky o průměru 1 a 10 km. Zničení nebezpečně se blížícího NEO by bylo nezbytné tehdy, jestliže k náležitě změně jeho dráhy by bylo již pozdě. Protože by se fragmenty tělesa pohybovaly po původní dráze, vlastní srážku by nebylo možno odvrátit, ale jednotlivé fragmenty by již nemusely způsobit velké globální škody.

Ke změně dráhy těles kategorie NEO bylo by možno použít i jiných metod, které však prozatím jsou prakticky neproveditelné. Jestliže by bylo možno na povrchu planetky umístit dálkově řízený raketový pohon s dostatečnou zásobou paliva, pak vhodným manévrováním by bylo možno planetku navést velmi těsně k Zemi tak, aby gravitačním působením Země se dráha tělesa natolik pozměnila, že k setkání s naší planetou by v budoucnu již nedošlo. V případě, že by bylo možno planetku opatřit velkým plochami (plachtami), pak tlak slunečního záření by mohl její dráhu zdatelně změnit. Teoreticky se uvažuje i o možnosti změnit dráhy méně hmotných kosmických těles velmi výkonným laserem, který by vyvolal na povrchu planetky nebo na jádru komety asymetrický výron plynu z odtaveného materiálu.

Závěr

Lidstvo za dobu, kdy zaznamenává nějakým způsobem svou historii, tedy nejméně 3000 let, nezažilo prokazatelně ani jednu větší lokální kosmickou katastrofu. To je jedna z příčin, že odborně podložené úvahy o důsledcích takové události byly naprosto okrajovou tematikou. Teprve novější rozsáhlé výzkumy podporující hypotézu o klíčové úloze kosmické globální katastrofy v náhlých zvratech ve vývoji fauny a flóry na Zemi, a objevy četných malých těles sluneční soustavy křižujících dráhu naší planety, zásadně změnilo postoj vědecké komunity k těmto otázkám. Ke střetu Země s jiným větším tělesem sluneční soustavy došlo v minulosti mnohokrát a je zde jistá pravděpodobnost, že k tomu bude docházet i v budoucnu. Důsledky takové události mohou být fatální pro další osudy pozemské civilizace. V současné době máme jistou možnost kosmickou kolizi naší planety nejen v předstihu a s poměrně velkou přesností předpovědět, ale v zásadě je zde i reálná možnost kosmické katastrofě zabránit. Tím ovšem tato otázka nabývá zcela jiných a mnohem širších rozměrů mimo rámec odborných diskusí. Jakého charakteru mohou být politické, etické a sociální aspekty tohoto problému lze si jen domýšlet.

L i t e r a t u r a

- [1] B. MARSDEN: IAU Circular No. 5636 (1992), Cambridge, MA, USA.
- [2] B. MARSDEN: IAU Circular No. 5671 (1992), Cambridge, MA, USA.
- [3] B. MARSDEN: In op. [4] (1992).
- [4] Near-Earth-Objects Interception Workshop (1992) (G. H. Canavan, J. C. Solem, J. D. G. Rafter, eds.), LA-1246-C, Los Alamos, USA.
- [5] Z. CEPLECHA: *Influx of interplanetary bodies onto Earth*. *Astronomy and Astroph.* 263 (1992), 361.
- [6] L. W. ALVAREZ, W. ALVAREZ, F. ASARO, H. MICHEL: *Extraterrestrial cause for C-T extinction*. *Science* 208 (1980), 1095.
- [7] R. A. F. GRIEVE: *Terrestrial impact structures*. *Annual Rev. Earth. Planet. Sci.* 17 (1987), 245.
- [8] P. R. WEISSMAN: *Dynamical history of the Oort cloud*. In: *Comets in the Post-Halley Era* (R. L. Newburn, M. Neugebauer, J. Rahe, eds.), Kluwer Academic Publishers (1991), Dordrecht.
- [9] P. H. SCHULTZ, R. E. LIANZA: *Nature* 355 (1992), 234.
- [10] S. GLASSTONE, P. J. DOLAN: *The Effects of Nuclear Weapons*. U. S. Government Printing Office (1977), Washington D. C.
- [11] J. RAHE, V. VANÝSEK, P. WEISSMAN: *The core of comets*. In: *Cosmic Impacts Hazard*, Arizona Uni. Press (1993), Tuscon AZ, USA, v tisku.