VYSOKOŠKOLSKÉ SKRIPTÁ

Univerzita Komenského v Bratislave, Prírodovedecká fakulta

Pavel Uher

KOZMOGÉNNA GEOLÓGIA

2013

UNIVERZITA KOMENSKÉHO BRATISLAVA

© Prof. RNDr. Pavel Uher, CSc., 2013

Za odbornú stránku týchto vysokoškolských skrípt zodpovedá autor.

ISBN 978-80-223-3373-3

Obsah

Strana

Čo je to kozmogénna geológia ……4

1. Impaktné krátery na Zemi ……....7

   1.1. História objavovania impaktných kráterov ……...7

   1.2. Počet impaktných kráterov na Zemi a na Mesiaci.....10

   1.3. Výskyty impaktných kráterov na Zemi.....10

   1.4. Veľkosť a vek impaktových kráterov na Zemi.....14

   1.5. Vznik a vývoj impaktných kráterov.....17

   1.6. Fyzikálne podmienky impaktného procesu.....22

2. Impaktná šoková metamorfóza: proces a produkty.....25

   2.1. Proces impaktnej šokovej metamorfózy.....25

   2.2. Šokovo metamorfované horniny.....27

   2.3. Charakteristické minerály impaktnej šokovej metamorfózy.....30

3. Tektity.....34

   3.1. Definícia a genéza tektitov.....34

   3.2. Fyzikálne vlastnosti a zloženie tektitov.....38

   3.3. Svetové výskyty tektitov.....39

4. Meteority.....45

   4.1. Definícia, dopad a veľkosť mikrometeoritov a meteoritov.....45

   4.2. Klasifikácia, zloženie a genéza meteoritov.....47

   4.3. Meteority z územia Slovenska.....58

5. Impaktné kráterovanie v histórií Zeme: vplyv na evolúciu litosféry a života.....62

   5.1. Hádeanské a archaické impakty.....62

   5.2. Proterozoické impakty.....65

   5.3. Paleozoické impakty.....67

   5.4. Mezozoické impakty.....71

   5.5. Impakty na hranici mezozoika a kenozoika.....73

   5.6. Kenozoické impakty.....78

   5.7. Príčiny a riziká zrážky v minulosti a budúcnosti.....81

Doporučená a použitá literatúra.....87

Čo je to kozmogénna geológia ?

Všetci žijeme na Zemi, tretej najbližšej planéte našej hviezdy – Slnka. Zem je vesmírne teleso, tak ako miliardy miliárd iných, rôzne veľkých telies vo vesmíre. Naša planéta sa riadi tými istými univerzálnymi fyzikálnymi zákonmi, ako ostané hviezdy, planéty, mesiace, kométy, asteroidy a iné telesá v nami poznanom vesmíre a v našej Galaxií (Miečnej ceste). Planéta Zem vznikla spolu s ostatnými telesami našej Slnečnej sústavy asi pred 4,6 miliardami rokov (Ga) a od svojho vzniku až dodnes, ba dokonca až do svojho prirodzeného zániku (pri premene Slnka na hviezdu typu červeného obra, za ďalších cca 6-7 Ga) zdieľa ich spoločné osudy. Aj planéta Zem ako každé vesmírne teleso je v neustálej interakcií s ostatnými, najmä susednými vesmírnymi objektami.

Gravitačná sila, jedna zo základných fyzikálnych vlastností známeho vesmíru, je zodpovedná za neustále vzájomné pôsobenie hmotných častíc, od atomárnej a molekulárnej úrovne, cez minerály, horniny, po úroveň planetárnu až galaktickú. Vplyvom gravitácie sa rôzne veľké častice vo vesmíre ovplyvňujú a priťahujú, a pri určitých okolnostiach zrážajú, pričom vytvárajú jednak drobnejšie úlomky a jednak sa znova spájajú do nových celkov. Pri takomto gravitačnom spájaní (akrécií) pred približne 4,56 Ga sa vytvorilo aj teleso našej Zeme, spolu s Marsom, Venušou, Jupiterom, Saturnom a ďalšími planétami. To však bol len začiatok …

Najmä v ranom štádiu vývoja bol priestor našej Slnečnej sústavy plný relatívne menších telies, ktoré neustále do seba narážali, rozbíjali sa a naopak opätovne nabalovali do nových a väčších telies. Neustále nárazy (kolízie) vydržali len tie najväčšie telesá a ich gravitačne pritiahnuté satelity – mesiace. Aj súčasná podoba mesiacov je však výsledkom mnohonásobných nárazov (impaktov) a opätovných akrécií. Predpokladá sa, že aj náš verný sprievodca po oblohe – Mesiac vznikol po kolízií menšej planéty s mladou Zemou. Obrovský náraz rozbil menšiu planétu na viac kusov, pričom odštiepil obrovské množstvo materiálu aj zo Zeme. Gravitačne zachytené úlomky tejto kolosálnej kolízie obiehali okolo Zeme, ale súčasne množstvom menších vzájomných kolízií a gravitačného priťahovania sa postupne nabalovali na väčšie teleso – náš Mesiac. Gravitačné pôsobenie v rámci veľkých telies (rádovo s polomerom nad 1000 km), spojené s preskupovaním hmoty, jej postupným zahrievaním až magmatickým tavením hornín dokončilo prvú etapu evolúcie terestrických planét (Merkúr, Venuša, Zem a Mars) a veľkých mesiacov do podoby takmer guľovitých

telies s horninovou stratifikáciou, kde hustotne najťažšie hmoty, bohaté kovovým železom tvoria jadro, obalené silikátovým plášťom, prípadne kôrou.

Uvedená prvá dramatická etapa vzniku našej Slnečnej sústavy netrvala z geologického hľadiska príliš dlho, len prvé desiatky až stovky miliónov rokov (Ma). Dokumentujú nám to rádiometrické izotopové veky najstarších minerálov na Zemi (zirkóny staré 4,4 Ga), datovanie veľkej väčšiny meteoritov a mesačných hornín. Približne prvých vyše 600 Ma (do doby cca pred 3,8 Ga) však trvalo veľmi intenzívne bombardovanie mladej Zeme, ale aj ostatných planét a mesiacov menšími, dosiaľ „nezaradenými“ telesami (malými planétami, asteroidami). A práve rané obdobie v živote našej Zeme je kľúčové pre jej ďalší, aj dnešný charakter. Vtedy sa vytvorila kontinentálna a oceánická kôra, postupne sa formovala atmosféra, neskôr hydrosféra a vznikli aj prvé živé organizmy (približne pred 3,8 Ga ?).

Dôkazy prítomnosti ľadu, ako aj mnohých organických zlúčenín (vrátane amínokyselín) na kométach a asteroidoch už dávnejšie rozprúdili neutíchajúcu diskusiu o možnom extraterestrickom (mimozemskom) pôvode vody a života. Katastrofické dôsledky ďalších impaktov naopak neskôr život na Zemi takmer zničili (podľa niektorých hypotéz dokonca život na Zemi musel vzniknúť viackrát nanovo). Pády (impakty) vesmírnych telies, najmä meteoritov, mali a majú tak zásadný vplyv na evolúciu Zeme, najmä na jej povrch, zemskú kôru a evolúciu života, budujú aj ničia našu planétu od prekambria podnes. V procesoch evolúcie Zeme tak rozlišujeme tri zásadné geologické procesy, ktoré formujú našu planétu od jej vzniku:

1. Endogénne procesy, zahŕňajúce javy, vznikajúce v hĺbke litosféry, v plášti a jadre. Zaraďujeme k nim procesy platňovej tektoniky (najmä riftogenézu, subdukciu, kolíziu) a nimi späté vyššie teplotné a tlakové metamorfné a magmatické procesy (plutonizmus a vulkanizmus), zemetrasenia, ako aj vznik endogénnych ložísk nerastných surovín. Endogénne procesy sú pravdepodobne generované konvenčnými prúdmi a ultrahlbokými procesmi v spodnom plášti a jadre.

2. Exogénne procesy, ktoré formujú povrch Zeme v interakcií s hydrosférou a atmosférou. K nim patria nízkoteplotné, sedimentárne procesy (usadzovanie, zvetrávanie, činnosť oceánov, jazier, riek, ľadovcov, vznik klastických sedimentov, evaporitov, karbonátov, jaskýň) a biogénne procesy (činnosť organizmov – najmä rastlín a živočíchov, vznik napr. ropy, zemného plynu a uhlia). Špecifickou stránkou sú antropogénne procesy, vzniknuté činnosťou človeka, ktoré v posledných storočiach podstatne menia tvár povrchu Zeme. Zatiaľ majú skôr povahu exogénnych procesov, ale úspešné ovládnutie

vysokoteplotných a vysokotlakových procesov človekom (napr. využitie nukleárnej energie) už zasahuje aj do antropogénnych endogénnych procesov.

3. Kozmogénne procesy zahŕňajú interakciu planéty Zeme a ostatných vesmírnych telies. Tieto procesy nemajú charakter endogénnych procesov, pretože nevznikajú vo vnútri Zeme, ale naopak prichádzajú zvonka. Na druhej strane sa nejedná ani o exogénne procesy, pretože pri nich vznikajú veľmi vysoké teploty a tlaky, tavenie hornín a ich metamorfóza. Na rozdiel od väčšiny klasických magmatických a metamorfných endogénnych procesov, ktoré trvajú rádovo roky až desiatky miliónov rokov (napr. vznik riftov a pohorí), pri dopade vsemírneho telesa (v závislosti od jeho veľkosti) vzniká veľmi prudká a vysoká šoková metamorfóza (rádovo až tisíce °C a stovky GPa), ktorá však trvá rádovo len stotiny, či desatiny sekundy až prvé minúty. Podobné procesy svojim extrémne krátkym trvaním a súčasne obrovskou uvoľnenou energiou možno porovnať len k ničivým zemetraseniam, alebo výbuchom nukleárnych bômb.

V publikácií, ktorú práve držíte v ruke, by som Vám chcel aspoň v skratke priblížiť niektoré charakteristické aspekty a zaujímavosti, ktoré sa týkajú kozmogénnej geológie, teda geologické procesy a fenomény vznikajúce pri zrážkach (kolíziach) Zeme s kozmickým materiálom. Stručne sa zoznámime s impaktnými krátermi na Zemi, ich vznikom, minerálmi a horninami, vznikajúcimi pri impaktoch a šokovej metamorfóze, ako aj s tektitmi a meteoritmi. Povieme si aj o významných impaktoch v histórií Zeme a ich dôsledkoch na litosféru a živé organizmy. Verím, že to bude pútavé a vzrušujúce čítanie. Poznanie vplyvov a dôsledkov kozmogénnych javov má nepochybne zásadný význam pre pochopenie evolúcie našej planéty od jej vzniku až po súčasnosť. Napokon, bez neustáleho extraterestriálneho impaktného bombardovania Zeme by sme tu neboli ani my, ľudia a naša civilizácia …

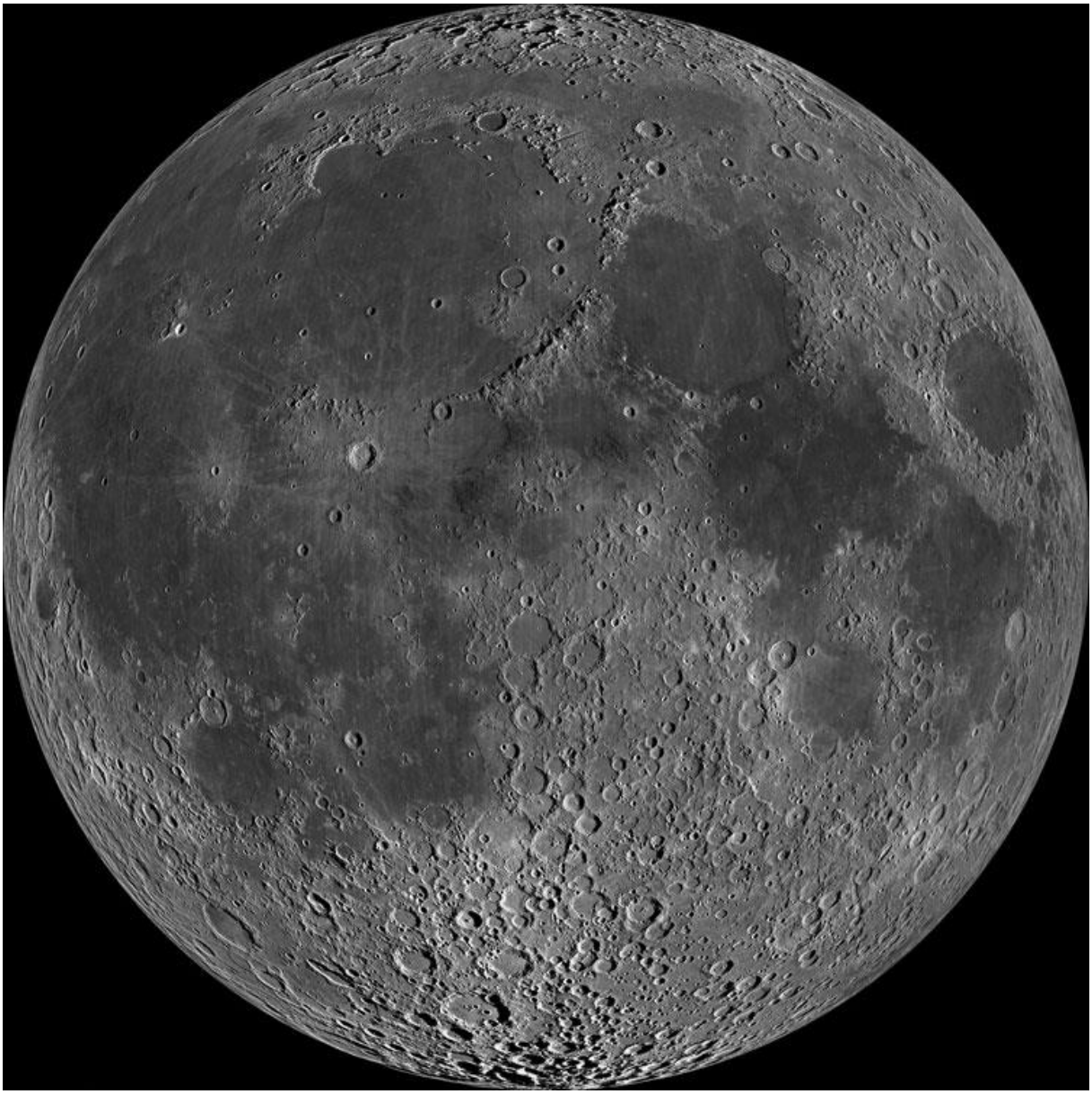
Poďakovanie. Je mi milou povinnosťou poďakovať na tomto mieste všetkým, čo prispeli k realizácií týchto učebných textov, najmä recenzentovi prof. Vladimírovi Porubčanovi, DrSc. (Fakulta matematiky, fyziky a informatiky, Univerzita Komenského, Bratislava) za kritické posúdenie práce, ktoré skvalitnilo výsledný text. Ďakujem svojej manželke, Jarmile Uhrovej Kernovej za pomoc pri zostavovaní tabuliek a zhotovenie fotografií meteoritov a tektitov.

Bratislava, november 2013

1. IMPAKTNÉ KRÁTERY NA ZEMI

1.1. História objavovania impaktných kráterov

Keď v roku 1609 slávny taliansky vedec Galileo Galilei namieril svoj prvý primitívny ďalekohľad na náš Mesiac, určite so zatajeným dychom pozoroval dovtedy neznáme detaily na povrchu nášho najbližšieho vesmírneho súputníka. A najnápadnejšími útvarmi, kroré pozoroval, boli početné viac-menej pravidelne kruhové štruktúry, zvané krátery ***(obr. 1)***. Až



Obr. 1. *Fotografia privrátenej strany Mesiaca s veľkým množstvom kráterov (Zdroj: Lunar Reconnaissance Orbiter, NASA; www.cseligman.com/text/moons/moonmap.htm).*

do druhej polovice 19. storočia sa však mesačné krátery považovali za sopečné (vulkanické) krátery a ich možný impaktný pôvod v dôsledku dopadu meteoritov prvý raz nastolil anglický astronóm Richard A. Proctor v r. 1873. Vtedajší vedci však tento názor odmietli a neskôr ho sám Proctor radšej opustil. Hlavná príčina tejto kritiky bola jasná: vznik často obrovských kráterov na Mesiaci (desiatky až stovky km v priemere) by vyžadoval mohutné, priam katastrofické meteoritické bombardovanie, o čom v tej dobe neboli známe žiadne analógie a dôkazy práve zo Zeme. Ak existujú krátery, spôsobené dopadom (impaktom) na Mesiaci, predsa logicky musia byť aj na Zemi. Ale na Zemi žiadne takéto impaktné krátery neboli nájdené; pozemské krátery síce existujú, jedná sa však o činné, alebo vyhasnuté vulkány, veď z niektorých z nich stále vyteká láva, vyvrhujú balvany a vypúšťajú sopečné pary ... Približne takáto bola úroveň geologických vedomostí o Zemi, čo sa týka možných impaktných kráterov ešte na konci 19. storočia. Dovtedy pomerne vzácne nálezy a ešte vzácnejšie pozorované dopady zväčša malých meteoritov nikto nespájal so vznikom kráterov a všetky známe kruhové štruktúry sa považovali buď za sopečné, alebo sa ich pôvod považoval za neznámy.

Prvou kráterovou štruktúrou, ktorej impaktný pôvod bol jednoznačne dokázaný, je Meteor Crater (označovaný aj jako Barringerov kráter, resp. Canyon Diablo) v štáte Arizona (USA). Už prví americkí cestovatelia a osadníci si všimli jeho nápadný, pravidelne kruhový tvar s vyvýšenými okrajmi o priemere 1200 m, ktorý v púštnej krajine takmer bez vegetácie už na prvý pohľad pripomínal známe krátery na Mesiaci ***(obr. 2)***. Navyše chovatelia dobytka,

Obr. 2. *Barringerov kráter v Arizone, USA (Zdroj: Earth Impact Database; www.passc.net/ImpactDatabase/).*

ktorí sa po roku 1870 usadili v okolitej krajine, začali nachádzať v okolí záhadnej kruhovej štruktúry početné nepravidelné kusy hrdzavého železa, ktoré nápadne primomínali už vtedy známe železné meteority. Ich chemický a mineralogický rozbor neskôr potvrdil, že sa naozaj jedná o železné meteority. Kruhová štruktúra nebola sopečného pôvodu, pretože žiadne

vulkanické horniny, stopy po utuhnutej láve alebo vulkanické sklá sa v oblasti krátera, ani v širšom okolí nenašli. Napriek tomu viacerí geológovia stále vysvetľovali jeho vznik napr. mohutným podzemným výbuchom pary (G. K. Gilbert v r. 1896). Až následný podrobný geologický výskum, vrátane vrtov, ako aj ďalšie početné nálezy železných meteoritov, dokázali začiatkom 20. storočia pôvod krátera dopadom meteoritu (J. P. Barringer, G. P. Merril). Podnikaví Američania dokonca začali z Barringerovho krátera ťažiť meteoritické železo s prímesou cenného niklu, avšak nakoniec sa ukázalo, že jeho množstvo je síce pozoruhodné, ale nedostatočné na ekonomickú ťažbu.

Každopádne, morfologicky nádherne zachovaný meteoritový Barringerov kráter sa stal prvým neodškriepiteľne dokázaným impaktným kráterom na Zemi a je dodnes veľkou turistickou atrakciou Arizony. Práve jeho zachovalosť svedčí o tom, že dopad meteoritu sa udial geologicky len nedávno, v mladšom pleistocéne, pred približne 50 tisíc rokmi. A čo ďalšie impaktové krátery na našej planéte ? Objavovali a dokazovali sa sprvu len pomaly; okolo roku 1940 bolo známych len asi 20 kráterov na Zemi, pre ktoré bol dokázaný, alebo sa predpokladal ich meteoritický pôvod. Výraznejší posun nastal až s rozvojom geologických vied, spojeným s vývojom nových presnejších petrologických, mineralogických a geochemických laboratórnych metód výskumu a v neposlednom rade aj systematickým snímkovaním povrchu našej planéty kozmickými družicami (diaľkový prieskum Zeme), od 70. rokov 20. storočia ***(obr. 3)***. Pre pochopenie samotného impaktného procesu veľmi

Obr. 3. *Vesmírna stanica ISS na kráterom Manicouagan v Kanade, apríl 2001 (Zdroj: Earth Impact Database; www.passc.net/ImpactDatabase/).*

pomohlo aj experimentálne modelovanie impaktov a identifikácia ultravysoko tlakových a teplotných fenoménov a transformácií v mineráloch a horninách.

1.2. Počet impaktných kráterov na Zemi a na Mesiaci

Vďaka moderným výskumným metódam sa počet identifikovaných impaktných kráterov na Zemi rýchlo zvyšoval a v roku 2013 bolo celkovo evidovaných 184 kráterov (Earth Impact Database), ktoré majú jasne preukázaný impaktný pôvod ***(obr. 4, tab. 1)***. Naviac sa v odbornej literatúre diskutuje o ďalších desiatkach kruhových štruktúr, ktoré by mohli mať impaktový pôvod, ale jednoznačné dôkazy zatiaľ chýbajú. Ale aj napriek uvedenému pokroku v identifikácií, je množstvo známych a možných meteoritických kráterov na Zemi (rádovo v stovkách) stále žalostne málo v porovnaní s približne 5200 známymi impaktnými krátermi na oveľa menšom telese – na Mesiaci, aj to len tými väčšími s priemerom najmenej 20 km ! Navyše na Mesiaci sú odhadom desaťtisíce menších kráterov. A pritom Zem je podstatne väčšie teleso, ako Mesiac; zemský povrch meria približne 510 miliónov km^2, teda 13,5-krát viac jako povrch Mesiaca (cca 38 mil. km^2). A predsa je odhadovaná hustota impaktných kráterov na Mesiaci asi 1280-krát väčšia, ako hustota známych kráterov na Zemi. Aj rozmery najväčších mesačných kráterov sú väčšie, ako na Zemi. Najväčší kráter na Mesiaci a zrejme aj najväčší doteraz známy kráter v Slnečnej sústave tvorí obrovskú panvu South Pole-Aitken; nachádza sa na odvrátenej strane neďaleko mesačného južného pólu, má priemer 2 240 km a hĺbku 13 km. Najväčší doteraz zistený impaktný kráter na Zemi je kruhová štruktúra Vredefort v Juhoafrickej republike s priemerom maximálne 300 km ***(tab. 1).*** Aj na ostatných terestrických planétach našej Slnečnej sústavy nájdeme obrovské množstvo impaktových kráterov (najmä na Merkúre), početnými krátermi je zbrázdený aj povrch mesiacov Jupitera, Saturnu, Uránu a Neptúnu, ako aj malých objektov Slnečnej sústavy, najmä asteroidov.

1.3. Výskyty impaktných kráterov na Zemi

Logicky sa natíska otázka, prečo je na našej Zemi tak málo identifikovaných kráterov a Mesiac a iné telesá sú nimi priam posiate ? Meteority dopadali a dopadajú predsa na Zem rovnako husto, ako na iné telesá Slnečnej sústavy, aj zákony gravitácie musia platiť rovnako.

Obr. 4. *Svetová mapa potvrdených výskytov impaktných kráterov na Zemi, stav z r. 2013 (Zdroj: Earth Impact Database; www.passc.net/ImpactDatabase/).*

Odpoveď na otázku údajného „nedostatku“ impaktných štruktúr treba hľadať v unikátne vysokej geologickej dynamike Zeme oproti iným telesám Slnečnej sústavy. Ako je známe, na našej planéte prebiehajú intenzívne endogénne procesy, hlavne pohyby litosférických platní, pričom v dôsledku riftogenézy, subdukcie a kolízie dochádza k neustálej recyklácií zemskej kôry a vrchného plášťa, vzniku novej a zániku starej litosféry. Navyše treba počítať s intenzívnym pôsobením exogénnych geologických procesov, najmä zvetrávaním, činnosťou organizmov a neustále sa opakujúcimi sedimentačnými cyklami. Na Zemi je veľmi aktívna hydrosféra a atmosféra. A práve veľmi dynamické pôsobenie uvedených endogénnych aj exogénnych procesov počas celej evolúcie našej planéty (vyše 4 miliardy rokov !) relatívne rýchlo zotiera stopy po impaktných kráteroch. V neposlednom rade relatívne hustá a hrubá atmosféra Zeme spôsobuje vysoké trenie dopadajúcich meteoritov aj väčších telies, ich rýchle zahriatie, čiastočné tavenie a rozpad až výbuch počas preletu v atmosfére, pričom len časť väčších telies má šancu dopadnúť až na povrch Zeme.

Preto v dôsledku intenzívnej endogénnej a exogénnej geologickej činnosti na Zemi majú šancu sa zachovať len relatívne veľké a hlboké impaktové krátery; v prípade ak sú zachované menšie krátery, jedná sa vždy o geologicky relatívne mladé útvary. Veľké množstvo, pravdepodobne dokonca väčšina starších a menších impaktných kráterov na Zemi

kráter (štát)	priemer (km)	vek krátera (Ma)
Acraman (Austrália)	90	~ 590
Amelia Creek (Austrália)	20	600 - 1640
Ames (USA)	16	470 ± 30
Aorounga (Čad)	12,6	< 345
Araguainha (Brazília)	40	254,7 ± 2,5
Avak (USA)	12	3 - 95
Beaverhead (USA)	60	~ 600
Boltyš (Ukrajina)	24	65,82 ± 0,74
Bosumtwi (Ghana)	10,5	1,13 ± 0,10
Carswell (Kanada)	39	115 ± 10
Clearwater Lake East (Kanada)	26	290 ± 20
Clearwater Lake West (Kanada)	36	290 ± 20
Deep Bay (Kanada)	13	99 ± 4
Dellen (Švédsko)	19	89,0 ± 2,7
Dhala (India)	11	1700 - 2100
Eagle Butte (Kanada)	10	< 65
Eľgygytgyn (Rusko)	18	3,5 ± 0,5
Flaxman (Austrália)	10	> 35
Glikson (Austrália)	19	< 508
Gosses Bluff (Austrália)	22	142,5 ± 0,8
Gweni-Fada (Čad)	14	< 345
Haughton (Kanada)	23	~ 39
Charlevoix (Kanada)	54	400 - 470
Chesapeake Bay (USA)	40-90	35,67 ± 0,28
Chicxulub (Mexiko)	150-200	66,07 ± 0,37
Jänisjärvi (Rusko)	14	700 ± 5
Kaluga (Rusko)	15	380 ± 4
Kamensk (Rusko)	25	49,0 ± 0,2
Kara (Rusko)	65-120	67,27 ± 1,89
Karakul (Tadžikistán)	52	< 25
Karla (Rusko)	10	5 ± 1
Kelly West (Austrália)	10	> 550
Kentland (USA)	13	< 97
Keurusselkä (Fínsko)	30	1140 ± 6
Lappajärvi (Fínsko)	23	76,2 ± 0,27
Lawn Hill (Austrália)	18	> 515
Loganča (Rusko)	20	40 ± 20
Logojsk (Bielorusko)	15	29,71 ± 0,48
Luizi (DR Kongo)	17	< 573
Manicouagan (Kanada)	85-100	214,56 ± 0,05
Manson (USA)	35	73,8 ± 0,3
Marquez (USA)	12,7	58 ± 2
Mistastin (Kanada)	28	36,4 ± 4
Mjølnir (Nórsko)	40	142,0 ± 2,6
Montagnais (Kanada)	45	50,50 ± 0,76

kráter (štát)	priemer (km)	vek krátera (Ma)
Morokweng (JAR)	70	145,2 ± 0,8
Nicholson (Kanada)	12,5	< 400
Oasis (Líbya)	18	< 120
Obolon (Ukrajina)	20	169 ± 7
Paasselkä (Fínsko)	10	< 1800
Popigaj (Rusko)	90-100	35,7 ± 0,2
Presqu'ile (Kanada)	24	< 500
Prince Albert (Kanada)	25	130 - 450
Pučež-Katunki (Rusko)	40-80	167 ± 3
Ries (Nemecko)	24	14,83 ± 0,15
Rochechouart (Francúzko)	23	201,4 ± 2,4
Saint Martin (Kanada)	40	220 ± 32
Serra da Cangalha (Brazília)	12	< 300
Shoemaker (Austrália)	30	1630 ± 5
Sierra Madera (USA)	13	< 100
Siljan (Švédsko)	52	377 ± 2
Slate Islands (Kanada)	30	~ 450
Spider (Austrália)	13	> 570
Steen River (Kanada)	25	91 ± 7
Strangways (Austrália)	25	646 ± 42
Suavjärvi (Rusko)	16	~ 2400
Sudbury (Kanada)	130-250	1849,3 ± 0,3
Ternovka (Ukrajina)	11	280 ± 10
Tookoonooka (Austrália)	55	128 ± 5
Upheaval Dome (USA)	10	< 170
Vargeao Dome (Brazília)	12	< 70
Vredeford (JAR)	140-300	2023 ± 4
Wells Creek (USA)	12	200 ± 100
Woodleigh (Austrália)	40-120	364 ± 8
Yarrabubba (Austrália)	30	~ 2000
Žamanšin (Kazachstán)	14	0,9 ± 0,1

Tab. 1. *Registrované impaktné štruktúry na Zemi s priemerom kráteru od 10 km (stav k r. 2012). Spracované podľa Earth Impact Database a najnovších dostupných výsledkov datovania impaktov. Priemer niektorých veľkých komplexných kráterov (≥ 40 km) nie je v teréne jednoznačný, rôzni autori udávajú odlišné hodnoty. V tomto prípade je uvedený minimálny a maximálny priemer, udávaný v literatúre.*

už definitívne zanikla, alebo sú erodované a denudované do takej hĺbky, že už nemožno s istotou rozoznať ich pôvod. A netreba zabúdať ani na fakt, že približne 2/3 povrchu Zeme tvoria oceány a moria, kde aj modernými metódami len veľmi ťažko možno detekovať impaktné štruktúry. Priamo v oceáne bol objavený len kráter Mjølnir severne od pobrežia Nórska a čiastočne do Mexického zálivu zasahuje aj známy kráter Chicxulub. Rozľahlé

plochy oceánov a morí tak nepochybne ešte skrývajú desiatky, pravdepodobne však až stovky dosiaľ neobjavených impaktných štruktúr. Zle pozorovateľné sú krátery aj v silne zalesnených oblastiach tropických dažďových pralesov (najmä Južná Amerika, stredná Afrika) a mladých pohorí (napr. Himaláje, Kordillery, Alpy), ako aj ťažko prístupných a zaľadnených polárnych oblastiach (Antarktída, Grónsko). Naopak na detekciu impaktových štruktúr sú vhodné najmä staré (archaické až proterozoické) kontinentálne štíty a platformy, najmä ak sa nachádzajú v púštnych alebo stepných oblastiach bez vegetácie (Sahara, centrálna časť Austrálie) – ***obr. 5***. Navyše v geologicky dobre preskúmaných oblastiach vyspelých krajín mierneho pásma s

Obr. 5. *Jednoduchý impaktný kráter Tenoumer (Mauretánia) s priemerom 1,9 km leží uprostred púšte Sahara. (zdroj: Google Earth, výška 5,6 km).*

vysokou koncentráciou ľudských sídiel a dobrou dostupnosťou boli už dávnejšie identifikované viaceré impaktné štruktúry (napr. Nemecko, Švédsko, USA, Rusko, Ukrajina). Nápadne kruhový tvar impaktných kráterov sa veľmi dobre vyhľadáva pomocou kozmických družíc, niekedy sú však jasne viditeľné aj na geologických mapách, hoci ich autori impaktný pôvod týchto štruktúr často ani len netušili ***(obr. 6)***.

Na druhej strane Mesiac, Merkúr a ďalšie menšie telesá Slnečnej sústavy (napr. väčšina mesiacov Jupitera, Saturna, planétky a asteroidy) majú zväčša veľmi riedku atmosféru, takže dopadajúce telesá tak často nezhoria v ich plynnom obale a dopadnú na povrch. Najmä však sú to telesá s ďaleko menšou vnútornou aj vonkajšou geologickou dynamikou, takže krátery (aj tie veľmi staré) sú na ich povrchu veľmi dobre zachované.

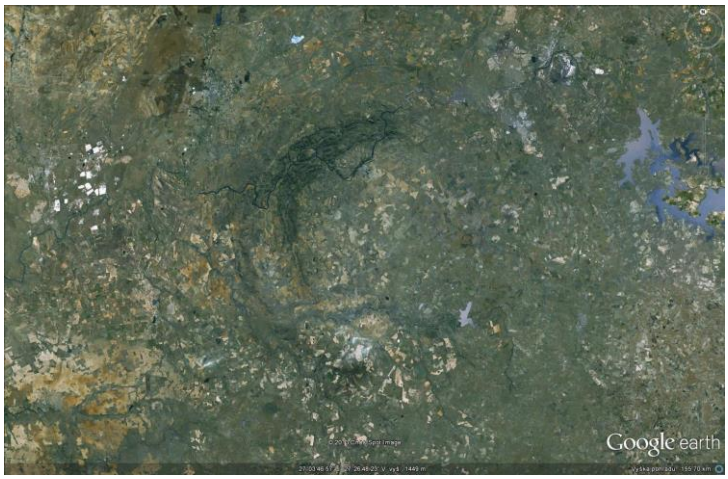
1.4. Veľkosť a vek impaktných kráterov na Zemi

Ako sme si už povedali, intenzívna geologická činnosť na Zemi nám pravdepodobne nezachovala najstaršie impaktné štruktúry z doby najintenzívnejšieho meteoritického bombardovania Zeme (4,56 – 3,8 Ga). Predpokladá sa dokonca, že mladá planéta Zem sa tesne po svojom vzniku (pred asi 4,5 Ga) zrazila s menšou planétou veľkosti Marsu. V dôsledku tejto gigantickej kolízie sa menšia planéta úplne rozpadla a čiastočne vyparila, avšak dopad vymrštil aj obrovské množstvo materiálu zo Zeme. Práve zmiešaním materiálu mladej Zeme a dopadnutej planéty sa akréciou vytvoril náš Mesiac. Veľké impakty sa zrejme intenzívne podieľali na evolúcií Zeme počas prvých 600 - 700 miliónov rokov od jej vzniku.

Obr. 6. *Historická geologická mapa impaktného kráteru Steinheim v Nemecku (priemer 3,8 km) od W. Kranza z roku 1923 (Zdroj: www.impact-structures.com).*

Niektoré hypotézy dokonca predpokladajú, že aj vodu a organické molekuly, nevyhnutné na vznik života, priniesli na Zem dopadajúce kozmické telesá.

Najstarší možný zvyšok po impaktnom krátere na našej planéte je len nedávno (v roku 2011) identifikovaná štruktúra Maniitsoq na JZ pobreží Grónska; má priemer okolo 100 km a vek približne 3 Ga (stredné archaikum). Zatiaľ však chýbajú jednoznačné dôkazy o impaktnom pôvode tejto štruktúry. Mladší, spodnoproterozoický vek vykazujú najväčšie pozemské impaktné krátery Vredefort v Juhoafrickej republike (vek okolo 2,0 Ga, priemer sa uvádza v rozmedzí 140 až 300 km) – ***obr. 7*** a Sudbury v Kanade (1,85 Ga, priemer



Obr. 7. *Archaická, 2,023 Ga stará impaktná štruktúra Vredefort (JAR) s priemerom 140-300 km má jasne viditeľnú už len západnú časť kráterového valu. Je to najväčšia známa impaktová štruktúra na Zemi (Zdroj: Google Earth, výška 155 km).*

130 - 250 km). Medzi najväčšie svetové impaktné krátery patrí aj známy Chicxulub na mexickom pobreží polostrova Yucatán s priemerom okolo 150 - 200 km, ktorého dopad vymedzuje hranicu mezozoika a kenozoika (66 Ma). Veľkosť 50 až 100 km majú aj krátery Popigaj v Rusku, Acraman v Austrálií, Manicouagan (Kanada), Morokweng (Juhoafrická republika), Kara (Rusko), Beaverhead (USA), Tookoonooka (Austrália), Charlevoix (Kanada), Siljan (Švédsko) a Karakul (Tadžikistán). Tieto veľké impaktné štruktúry sú obyčajne geologicky relatívne staré – prekambrické (Vredefort, Sudbury, Acraman, Beaverhead), paleozoické (Charlevoix, Siljan) alebo mezozoické až paleogénne (staršie ako 50 Ma: Chicxulub, Manicoagan, Morokweng, Kara, Tookoonooka), jedine kráter Popigaj má cca 36 Ma a Karakul má zrejme menej ako 25 Ma. Geologicky mladé impaktné krátery (neogénne až recentné, mladšie ako 20 Ma) majú obvykle menšie rozmery; medzi najväčšie patria Ries v Nemecku (priemer 24 km, vek ~15 Ma), Bosumtwi v Ghane (10,5 km, ~1 Ma), alebo Žamanšin v Kazachstane (13,5 km, ~0,9 Ma). Každý rok sú však objavované nové impaktné krátery na Zemi a súčasný počet známych štruktúr (vyše 180) bude určite rásť.

Pre zaujímavosť možno uviesť, že v roku 1989 bol na základe interpretácie družicových snímok publikovaný šokujúci názor, že aj Český masív je vlastne zvyšok po obrovskom meteoritovom krátere. Skutočne pri pohľade na geografickú aj geologickú mapu Českého masívu zaujme skoro kruhový tvar tejto štruktúry, kde okrajové vrchoviny kopírujú bývalý kráterový val, pričom v strede je vyvinutá depresia a stredový pahorok ***(obr. 8)***. Táto údajná impaktná štruktúra má priemer okolo 250 až 300 km a patrila by tak medzi najväčšie

Obr. 8. *Zdanlivo kruhová štruktúra Českého masívu zvádza k predstave, že sa jedná o obrovský impaktný kráter s priemerom 250-300 km (Zdroj: Google Earth, výška 424 km).*

známe impaktné krátery na Zemi. Vek vzniku údajného Českého kráteru bol odhadnutý na 2 miliardy rokov. Aj keď boli neskôr nájdené geologické fenomény, interpretované ako dôkazy, potvrdzujúce impaktový pôvod Českého kráteru, hlavne geofyzikálne anomálie, údajné šokovo premenené horniny a minerály, jednoznačné dôkazy o impaktnom pôvode štruktúry Českého masívu stále chýbajú a veľká väčšina odborníkov v súčasnosti odmieta teóriu o impaktnom pôvode kruhovej, resp. oválnej štruktúry Českého masívu. Ako možné impaktné krátery boli študované aj kruhové štruktúry pri Ševětíne a Sušiciach v južných Čechách s priemerom okolo 50 km. Detailný mikroskopický výskum kremeňa z týchto lokalít však nepreukázal ich impaktný pôvod.

1.5. Vznik a vývoj impaktných kráterov

V súčasnosti už niet pochýb, že impaktné krátery na Zemi, Mesiaci, ako aj na iných telesách našej Slnečnej sústavy, či vesmíru, vznikli dopadom rôzne veľkých iných kozmických telies. Naša planéta, ako aj ostatné vesmírne telesá sú neustále vystavované vesmírnym kolíziam. Uvádza sa, že v súčasnosti na zemský povrch dopadá približne 130 000

ton meteoritickej hmoty z vesmíru za rok, čo činí okolo 356 ton kozmického materiálu denne. Odhaduje sa, že počas geologickej histórie Zeme (4,56 Ga) dopadlo na našu planétu rádovo až 10^{16} ton kozmického materiálu, čo činí približne 10^{-3} až 10^{-4} % (tisícinu až desaťtisícinu percenta) hmotnosti Zeme ($5{,}974.10^{21}$ ton). Samozrejme, najčastejšie sú to drobné až mikroskopické telesá (prachové častice - meteoroidy). Navyše, veľká väčšina kolidujúcich meteoroidov zhorí v hustej zemskej atmosfére a môžeme ich pozorovať počas jasných nocí len ako meteory, ľudovo povedané „padajúce hviezdy“. Sú to najmä povestné meteorické roje (napr. Perseidy, Leonidy), ktoré pravidelne v istých obdobiach dopadajú na Zem; vidíme vlastne len meteory – svetelné stopy v atmosfére, ktoré za sebou meteoroidy zanechávajú. Takmer všetky zhoria ešte desiatky kilometrov nad povrchom Zeme a len malá časť zvyškov väčších meteoroidov dopadá na pevný zemský povrch v podobe meteoritov. Takéto drobné telesá (rádovo menšie ako desiatky cm) však pri dopade na pevný povrch, pribrzdené atmosférou na dopadové rýchlosti desiatky resp. niekoľko sto $m.s^{-1}$, nemajú dostatočnú hmotnosť a kinetickú energiu na to, aby vyhĺbili impaktný kráter.

V podstatne zriedkavejších prípadoch sa však Zem zráža s väčšími kozmickými telesami o veľkosti rádovo desiatky metrov až kilometre. Takéto telesá majú dostatočnú hmotnosť a kinetickú energiu na to, aby ich úlomky prežili pád v hustej zemskej atmosfére, dopadli na Zem a obrovskú kinetickú energiu dopadu premenili na tvorbu impaktných kráterov. Kritické fyzikálne faktory, ktoré ovplyvňujú veľkosť a tvar kráteru, ako aj rozsah a intenzitu šokovej impaktnej metamorfózy a mechanického porušenia hornín a minerálov (terčového materiálu) sú najmä veľkosť a hmotnosť dopadajúceho telesa (impaktoru, projektilu), jeho minerálne zloženie, rýchlosť a uhol dopadu projektilu, ako aj fyzikálne, chemické a minerálne zloženie terčového materiálu. Inak reagujú pozemské sypké a vodou nasýtené sedimenty a pôda, inak ľadovce alebo pevné horniny, pričom rozdielne sa správajú kompaktné granity alebo amfibolity, ako napríklad vápence alebo bridličnaté horniny. Pórovité a sypké horniny dokážu výrazne stlmiť vplyv kinetickej energie projektilu, ako pevné horniny s vyššou hustotou. Aj dopad telesa do vodného prostredia má tlmivý účinok na pevné horniny dna oceánov, morí, jazier a riek. Podľa veľkosti (priemeru) a morfológie možno pozemské impaktové krátery rozdeliť na dve základné kategórie:

1) Jednoduché impaktné krátery, tvorené jednotnou kráterovou priehlbinou (depresiou) kruhového resp. eliptického tvaru a strmým valom po okraji kráteru ***(obr. 2 a 5)***. Sú najrozšírenejšie na Zemi, Mesiaci aj na iných telesách Slnečnej sústavy. Vo vnútri jednoduchých kráterov nie sú žiadne iné morfologické elevácie (valy, pahorky), alebo depresie (priekopy, prehĺbeniny). Tieto krátery majú maximálny priemer približne 2 km

v sedimentárnych horninách, alebo maximálne okolo 4 km v magmatických a metamorfovaných horninách. Sú to relatívne najhlbšie krátery vo vzťahu k ich malému priemeru; pomer maximálnej hĺbky jednoduchého kráteru k ich priemeru sa pohybuje medzi 1:5 až 1:7. To znamená, že jednoduchý impaktný kráter s priemerom 1 km má maximálnu hĺbku (v strede kráteru) okolo 140 až 200 m. Jednoduché impaktné krátery na Zemi vznikli dopadom menších kozmických telies, podľa prepočtov maximálne s veľkosťou do 100 m.

2) Komplexné (zložité) impaktné krátery, ktoré majú vo vnútornej časti kráterovej depresie vyvinutý centrálny pahorok alebo vnútorný val a vyznačujú sa komplikovanejšiou morfológiou okrajového valu s prítomnosťou viacerých terás ***(obr. 9)***. Komplexné krátery majú priemer väčší ako 2, resp. 4 km v závislosti od charakteru miestnych hornín. Komplexné krátery sú oproti jednoduchým kráterom často relatívne plytšie, s pomerom hĺbky a priemeru 1:10 až 1:20, čiže kráter s priemerom 20 km je hlboký 1 až 2 km, v závislosti od rýchlosti dopadu, zloženia dopadajúceho telesa a zloženia terčových pozemských hornín. Treba však podotknúť, že geologicky staré komplexné krátery na Zemi sú dnes morfologicky oveľa plytšie, pretože vonkajší kráterový val podľahol čiastočnej erózii a naopak dno pôvodného krátera je zanesené vrstvami mladších sedimentárnych hornín (to samozrejme platí aj pre jednoduché krátery). Komplexné impaktné krátery s priemerom 2 – 20 km majú v centrálnej časti jeden približne kruhový centrálny pahorok, väčšie komplexné krátery (priemer nad 20 km) sa vyznačujú ešte zložitejšou morfológiou; majú jeden alebo viac vnútorných valov. Napríklad známy kráter Chicxulub v Mexiku s priemerom okolo 180 km má 4 alebo 5 takýchto vnútorných valov. Na vytvorenie komplexného impaktného kráteru na Zemi je potrebný dopad kozmických telies (asteroidov, zvyškov komét) o veľkosti nad 100 m. Pri veľkosti dopadajúceho telesa (projektilu) približne 100 až 600 m sa vytvorí komplexný kráter s jedným centrálnym pahorkom. Ak je však veľkosť projektilu nad približne 600 m, vzniká komplexný kráter s vnútorným valom, alebo viacerými vnútornými valmi.

Treba poznamenať, že uvedené hodnoty veľkosti jednoduchých a komplexných kráterov sú závislé nielen na hustote projektilu a terčových hornín na mieste dopadu, ale aj od veľkosti gravitácie (tiaže) na povrchu Zeme, Mesiaca, planét či ich mesiacov. Čím je hodnota gravitácie vyššia (teda čím je hmotnejsšia a väčšia planéta alebo mesiac), tým je hranica medzi jednoduchými a komplexnými krátermi nižšia. Inými slovami, na hmotnejších a väčších vesmírnych telesách s vyššou gravitáciou sa pri dopade tých istých telies (s rovnakou hmotnosťou a hustotou) ľahšie vytvoria komplexné krátery, ako na menších a menej hmotných vesmírnych telesách. Ak je na Zemi táto hranica medzi 2 a 4 km, na Marse s jeho

oveľa nižšou gravitáciou (asi 1/3 zemskej gravitácie) dosahuje cca 10 km a na Mesiaci sa táto hraničná hodnota posúva na 12 – 20 km.

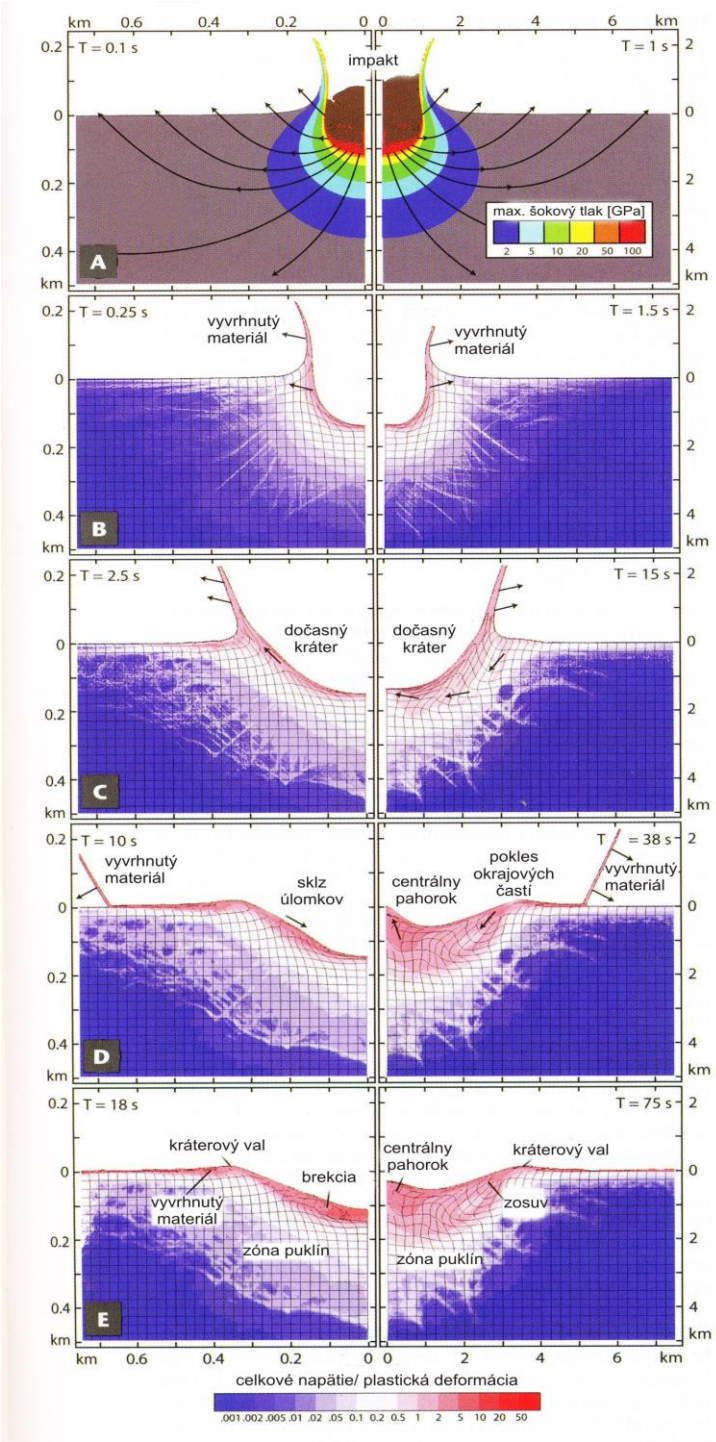
Obr. 9. *Výrazná morfológia komplexného krátera Upheaval Dome (Utah, USA) s priemerom 10 km, dvojitým prstencom a vyvýšeným stredovým pahorkom (Zdroj: Earth Impact Database; www.passc.net/ImpactDatabase/).*

Impaktný proces a vznik kráterov je relatívne mimoriadne krátka, avšak často veľmi výrazná geologická udalosť, ktorá trvá len niekoľko sekúnd (jednoduché krátery) až prvé minúty (komplexné krátery). Pri dopade väčších telies (rádovo stovky metrov až kilometre) možno rozlíšiť nasledovné etapy vzniku komplexných kráterov, pričom však celú evolúciu vzniku kráteru treba chápať ako jednotný kontinuálny proces ***(obr. 10)***:

(1) Prelet impaktoru (asteroidu, kométy) zemskou atmosférou, jeho čiastočné natavenie, prípadne rozpad na viac menších telies. Súčasná tvorba stlačeného extrémne horúceho vzduchového frontu tlačeného pred dopadajúcim telesom a predimpaktové natavenie až vaporizácia (vyparenie) povrchových zemských hornín, resp. pôdy (vznik tektitov);

(2) Samotný dopad mimozemského telesa (kompresné štádium). V tejto etape dochádza k maximálnemu stlačeniu (kompresií) pozemského horninového materiálu v mieste dopadu.

Samotné teleso často vybuchne a energia dopadu telesa sa okamžite mení na tepelnú a kinetickú energiu, spôsobujúcu šírenie vlny šokovej metamorfózy, roztavenie až vyparenie



Obr. 10. *Jednotlivé štádia impaktného procesu a vzniku komplexného krátera (Zdroj: Collins et al. 2012, Elements, 8, 1, s. 25-30 – upravené).*

(vaporizáciu) hornín a minerálov v bezprostrednej blízkosti dopadu, resp. rozbitie hornín vo vzdialenejšom priestore od dopadu. Nárazová tlaková vlna sa šíri od miestna dopadu telesa do periférnych oblastí formujúceho sa impaktného krátera;

(3) Dekompresné štádium (tlaková relaxácia), v dôsledku čoho vzniká centrálna dutina (dočasný kráter) v mieste vznikajúceho krátera. Dochádza súčasne k ďalšiemu šíreniu nárazovej tlakovej vlny, čo je spojené s vyvrhnutím obrovského množstva rozbitého, tlakovo postihnutého až nataveného materiálu do okolia vznikajúceho impaktného krátera;

(4) Zánik centrálnej dutiny a tvorba tzv. stredovej ihly v centre dopadu telesa vplyvom šírenia časti tlakovej vlny do stredu vznikajúceho krátera, spojené so šírením šokovej vlny a deštrukcie hornín smerom do stredu a potom znova od stredu formujúceho sa krátera a s tvorbou okrajového valu krátera;

(5) Konsolidácia krátera, spojená s gravitačným zrútením stredovej ihly a tvorba centrálneho pahorku z jej materiálu, prípadne vnútorného valu (alebo viacero vnútorných valov). Proces je spojený s postupným doznievaním šokovej metamorfózy a deštrukcie okolitých hornín, ako aj gravitačným zosúvaním a konsolidáciou stredového pahorku, príp. vnútorných valov a okrajového valu impaktného krátera.

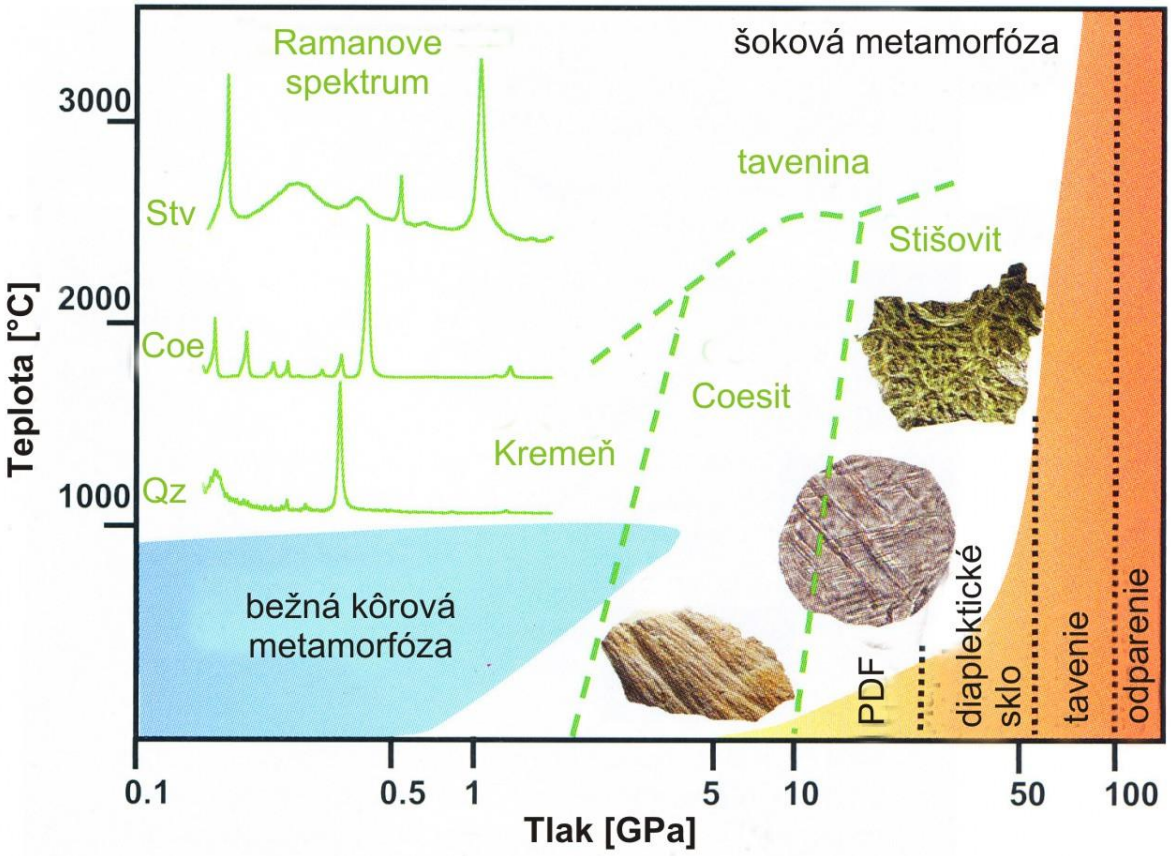
1.6. Fyzikálne podmienky impaktného procesu

Uvedené etapy vývoja impaktného krátera sú spojené s prenosom a uvoľnením obrovského množstva energie. Na základe výpočtov, experimentálnych výsledkov z laboratórií, ako aj priamych pozorovaní a meraní dopadov kozmických telies (prípadne analogických procesov, vyvolaných človekom, napr. pokusné jadrové výbuchy) možno tieto procesy viac-menej presne kvantifikovať.

Mimozemské telesá dopadajú na Zem vysoko nadzvukovými (hypersonickými) rýchlosťami; asteroidy v priemere 15 – 20 km/s (54 000 až 72 000 km/h), kométy až 30 – 35 km/s (108 000 až 126 000 km/h). Sú to rýchlosti približne 50 až 100-krát vyššie, ako je priemerná rýchlosť zvuku vo vzduchu pri hladine mora (okolo 340 m/s, alebo 1220 km/h). Kozmické telesá dopadajú na zemský povrch takmer vždy šikmo, odhaduje sa, že až 75 % všetkých dopadov sa udialo pod uhlom menším ako 60° a približne 25 % telies dopadlo pod uhlom menším ako 30°.

Kinetická energia sa pri dopade kozmických telies mení najmä na tepelnú a tlakovú energiu. Odhaduje sa, že celková hodnota energie pri impaktových procesov dosahuje rádovo

rozpätie 10^{13} až 10^{23} J (joulov). Takáto obrovská energia je porovnateľná s energiou, uvoľnenou pri podzemných jadrových výbuchoch nukleárnych zbraní. Teplota bezprostredne na mieste dopadu veľkých telies dosahuje 2 000 až 10 000 °C, tlak je rádovo 50 až vyše 100 GPa ***(obr. 11)***; tieto hodnoty sú oveľa vyššie, ako pri bežnej pozemskej metamorfóze



Obr. 11. *Teplotno-tlakový diagram fyzikálnych podmienok a typických produktov šokovej impaktnej metamorfózy (oranžové pole) v porovnaní s bežnou metamorfózou v zemskej kôre (modré pole). Súčasne sú vyznačené aj polia stability a Ramanove spektrá modifikácií SiO_2 - kremeňa (Qz), coesitu (Coe) a stišovitu (Stv) (Zdroj: Langenhorst a Deutsch 2012: Elements, 8, 1, s. 31-36 – upravené).*

a magmatizme v rámci litosféry. Takéto vysoké teploty a tlaky (cca 5 000 °C a okolo 350 GPa) sa predpokladajú v zemskom jadre a približne 6 000 °C je teplota povrchu Slnka. Treba však hneď poznamenať, že je tu zásadný rozdiel časového trvania šokovej impaktnej metamorfózy a metamorfných a magmatických procesov. Pri dopade kozmických telies sa uvedené teploty a tlaky dosiahnu za extrémne krátky čas (len desatiny až stotiny sekundy!) a aj ich doznievanie trvá rádovo sekundy až minúty (pričom je priamo úmerné veľkosti telesa), na rozdiel od procesov v pozemskej kôrovej až plášťovej metamorfóze, v zemskom

jadre, ako aj na povrchu Slnka, kde uvedené teplotno-tlakové podmienky trvajú rádovo milióny až miliardy rokov. Napríklad doba pôsobenia tlakovej vlny, ktorá spôsobuje šokovú metamorfózu, je na základe výpočtov len 2 - 3 sekundy pre kráter o priemere 10 km, resp. 5 - 8 sekúnd pre kráter Ries s priemerom 24 km. Len o niečo dlhší čas trvá premena a dopad vyvrhnutých hornín; približne 20 sekúnd pre kráter s priemerom 10 km. Na základe výpočtov a experimentálnych údajov vychádzajú nasledovné hodnoty priemeru impaktného kráteru, objemu a hmotnosti hornín, postihnutých šokovou metamorfózou, drvením a premiestnením, ako aj výslednou kinetickou energiou dopadu:

Priemer krátera (km)	Objem hornín (km^3)	Hmotnosť hornín (t)	Energia (J)
0,9	0,2	$5,3 \cdot 10^8$	10^{15}
5	35	$9 \cdot 10^{10}$	10^{17}
72	10^6	$2,5 \cdot 10^{15}$	10^{21}

2. IMPAKTNÁ ŠOKOVÁ METAMORFÓZA: PROCES A PRODUKTY

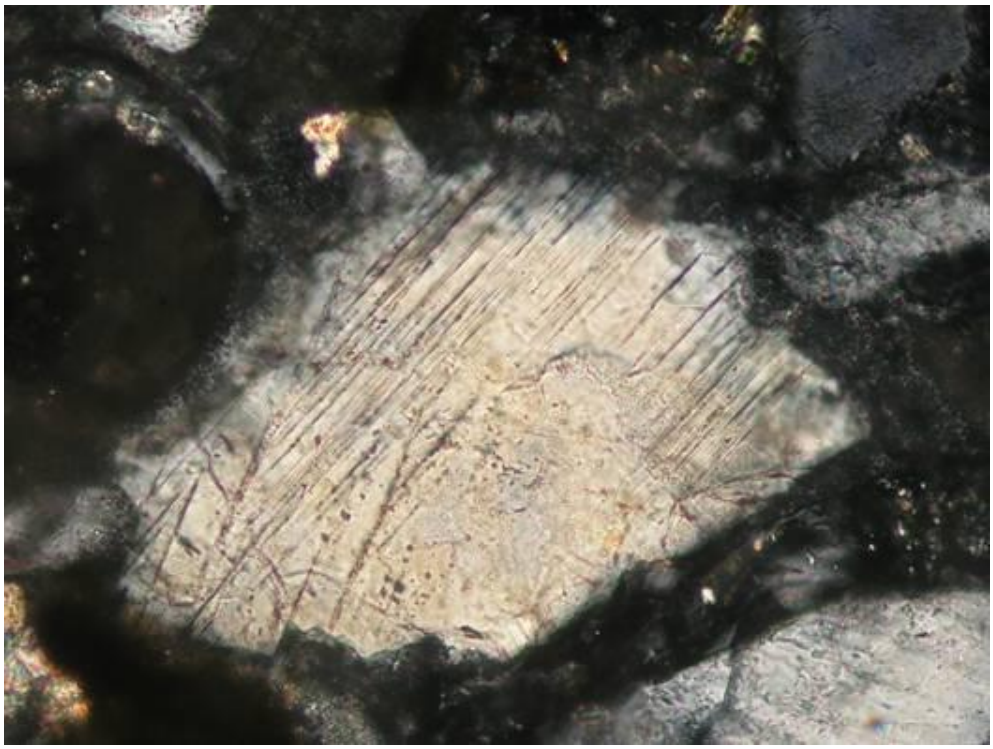
2.1. Proces impaktnej šokovej metamorfózy

Impaktná šoková metamorfóza patrí medzi najzaujímavejšie fenomény v rámci geologických procesov na Zemi. Je dôsledkom pôsobenia extrémne vysokej teploty a tlaku (do 3000 °C a až vyše 100 GPa) počas veľmi krátkej doby nárazu veľkého impaktného vesmírneho telesa (asteroidu, kométy) na pozemské horniny, ranej etapy tvorby kráteru (rádovo 10^{-9} až 10 sekúnd) a následného uvoľnenia tlaku (dekompresie). Vlna šokovej metamorfózy sa totiž v pevných horninách šíri hypersonickými (nadzvukovými) rýchlosťami. Tým sa šoková metamorfóza zásadne líši od klasickej regionálnej metamorfózy, ktorá prebieha za rádovo nižších teplôt a tlakov (zvyčajne pod 1000 °C a menej ako 5 GPa), avšak trvá rádovo tisíce až milióny rokov ***(obr. 11)***. Čiastočná podobnosť existuje len v prípade relatívne rýchlej kontaktnej vysokoteplotnej metamorfóze pri pozemských sopečných erupciach, kde teplota na kontakte horniny s tekutou lávou môžu dosiahnuť nad 1000 °C a k metamorfóze dôjde za veľmi krátky čas (rádovo sekundy až hodiny), avšak za pomerne nízkych tlakov (rádovo 0,01 až 0,1 GPa). Rýchlosť deformácie v štádiu **šokovej kompresie** hornín pri veľkých impaktných procesoch (rádovo 10^6 až 10^9 s^{-1}), je dokonca najmenej o 5 rádov vyššia, ako pri najsilnejších pozemských zemetraseniach, čo sú relatívne rýchle geologické procesy. Je logické, že čím väčšie a hmotnejšie teleso sa zrazilo so Zemou, tým výraznejšia bude aj šoková premena terčových hornín. Vplyvom **šokovej nárazovej vlny** dochádza k extrémnemu mechanickému namáhaniu hornín a minerálov. Kým v malých, jednoduchých kráteroch (do priemeru 4 km) dochádza najmä k mechanickému rozbitiu okolitých hornín bez ich masívnej metamorfózy, pri dopade veľkých telies (rádovo stovky metrov až kilometre) už dochádza k výrazným prejavom šokovej impaktnej metamorfózy v rámci komplexných kráterov a v ich bezprostrednom okolí. V dôsledku šokových metamorfných efektov dochádza k premene (transformácií) minerálov na ich **vysokotelotné a vysokotlakové formy**, ako aj k vzniku špecifických metamorfovaných hornín. Navyše časť pozemských hornín, resp. pôdy sa pri veľkom impakte roztaví až úplne vyparí do atmosféry. V zemskej atmosfére dochádza pri veľkých impaktoch ku vzniku tzv. **impaktného chochola**, teda horúceho oblaku, tvoreného zmesou drobných natavených úlomkov a plynov z terčových hornín, pôdy, prípadne aj splodín organického pôvodu (rastliny, živočíchy) spolu s rozhorúčenými atmosférickými plynmi. Tento horúci impaktný chochol prudko expanduje

v dôsledku výbuchu, sprevádzajúceho dekompresné štádium tvorby kráteru a môže migrovať atmosférou stovky až tisíce km. Časť vypareného silikátového materiálu potom počas preletu studenou atmosférou opäť rýchle kondenzuje za vzniku impaktných skiel, ktoré dopadajú na Zem vo vzdialenosti desiatky až tisíce km od kráteru; jedná sa o tzv. **distálne ejektá** (vzdialené dopadové materiály), najmä tektity a sférulity.

Možno rozlíšiť päť základných prejavov impaktnej šokovej metamorfózy, pozorovaných na postihnutých pozemských mineráloch a horninách, ktoré sú významnými diagnostickými znakmi a dôkazmi impaktného procesu:

(1) Deformácie minerálov a hornín, spojené s tvorbou mechanickej transformácie. V mineráloch sa tvoria mikroskopické rovné – planárne pukliny, mechanicky zdvojčatené kryštály a mozaikovitý rozpad kryštálov na drobné domény. Horniny sú drvené, tvoria sa impaktné brekcie, resp. tzv. nárazové kužele. Pri relatívne nižších tlakoch (2 – 5 GPa) sa tvorí nepravidelná sieť puklín až brekcie. **Planárne deformácie** sa objavujú až pri vyšších tlakoch (zhruba 5 – 15 GPa). Pri tlakoch nad 15 GPa už dochádza k vzniku tzv. planárnych elementov (**PDF**, napr. dokonalej štiepateľnosti kremeňa podľa určitých kryštalografických rovín – **obr. 12**), mozaikovitému rozpadu minerálov, zdvojčateniu kryštálov a niekedy aj k plastickým deformáciam minerálov.



Obr. 12. *Kremeň postihnutý šokovou metamorfózou s vyvinutými planárnymi deformačnými elementami (PDF). Impaktná brekcia (suevit), kráter Ries v Nemecku (Zdroj: www.impact-structures.com).*

(2) Fázové premeny (transformácie) pôvodných minerálov na ich vysokotlakové a vysokoteplotné modifikácie (bližšie údaje v kap. 2.3).

(3) Rozpad kryštálovej štruktúry minerálov na amorfné látky (amorfizácia). Proces prebieha v pevnej fáze, bez vzniku taveniny, v dôsledku čoho vznikajú v mineráloch amorfné domény až tzv. **diaplektické sklá**. Energia šokovej vlny pri tlakoch približne 25 až 60 GPa je schopná viac-menej úplne rozrušiť kryštálovú štruktúru minerálu a výsledkom je opticky izotropná amorfná látka (diaplektické sklo). Len lokálne sa môžu v amorfizovaných mineráloch zachovať zóny s kryštalickou usporiadanou štruktúrou. Bola pozorovaná čiastočná až úplná amorfizácia kremeňa, živcov, granátov, cordieritu, sillimanitu, titanitu, biotitu, amfibolov, apatitu a iných minerálov.

(4) Rozpad minerálov na dve a viac nových fáz, napr. vznik nového vysokotlakového-vysokoteplotného minerálu alebo minerálov (iného chemického zloženia ako východiskový minerál) a plynnej fázy. Ako príklad tohto procesu možno uviesť rozpad karbonátov (kalcitu, dolomitu) na CaO (vstupujúce do novo vznikajúcich silikátov, napr. pyroxénov ako v kráteri Chicxulub v Mexiku) alebo MgO (minerál periklas; kráter Haughton, Kanada) a CO_2, ktoré ako plyn uniká do atmosféry.

(5) Čiastočné až úplné roztavenie až vyparenie (vaporizácia) minerálov a hornín. Týmto spôsobom vytvorená kvapalná alebo plynná fáza môže následne rýchlo stuhnúť alebo kondenzovať späť na tuhú amorfnú fázu, najmä impaktné sklá, alebo tektity (kap. 3).

Pri relatívne nižších teplotách a tlakoch v rámci šokovej metamorfózy (zhruba pod 300 °C a 20 GPa) vznikajú fenomény mechanickej deformácie minerálov a hornín (**planárne pukliny, impaktové brekcie, nárazové kužele)**, alebo niektoré fázové premeny minerálov (napr. premena kremeňa na coesit a stišovit). Pri vyšších teplotách a tlakoch, okolo 300 až 1500 °C a 20 až 55 GPa už dochádza k amorfizácií niektorých minerálov a tvorbe diaplektických skiel, časť minerálov sa rozpadá (napr. karbonáty, silikáty). Napokon pri najvyšších stupňoch šokovej impaktnej metamorfózy, pri kolíziach s rádovo km veľkými telesami, ktoré zodpovedajú teplotám cca 1 500 až 10 000 °C a tlakom 55 až nad 100 GPa, sa všetky pozemské horniny a minerály čiastočne alebo úplne tavia alebo dokonca vyparujú.

2.2. Šokovo metamorfované horniny

Impaktné brekcie sa lokálne tvoria už v dôsledku impaktov menších kozmických telies (rádovo desiatky až stovky m), alebo v okrajových (distálnych) častiach komplexných kráterov pri dopade väčších asteroidov alebo komét. Pôvodné minerály a horniny impaktných

brekcií sú zväčša len mechanicky rozbité na chaotické ostrohranné, rôzne veľké úlomky, lokálne spoločne s jemne podrveným materiálom (matrix brekcie). Lokálne sú však v impaktových brekciach prítomné aj produkty tavenia hornín (impaktné sklá), alebo šokovo viac postihnutý materiál, ktorý dopadal na tvoriacu sa brekciu počas záverečných štádií tvorby kráteru. Treba si tiež uvedomiť, že obrovská kinetická energia po dopade kozmického telesa spôsobila v dekompresnom štádiu nielen rozbitie, ale aj odhodenie a transport často veľkých blokov miestnych hornín na vzdialenosti stovky m až kilometre. Je to proces porovnateľný s výbuchmi sopiek alebo veľkých bômb. Pri mikroskopickom štúdiu minerálov impaktných brekcií môžeme pozorovať napr. typické planárne deformácie v kremeni ***(obr. 11)***, alebo zirkóne. Medzi najznámejšie príklady impaktných brekcií patrí ***suevit***, ktorý vznikol v dôsledku impaktu v kráteri Ries v Nemecku a bol od stredoveku využívaný ako stavebný kameň v meste Nördlingen a okolí ***(obr. 13)***. Názov suevit sa používa aj na ostatné výskyty

Obr. 13. *Impaktová brekcia (suevit) z krátera Ries v Nemecku. Veľkosť: 14 x 8,5 cm. Materiál autora (foto Jarmila Uhrová Kernová).*

podobných impaktných brekcií vo svete.

Nárazové kužele (anglicky *shatter cones*) sú charakteristické makroskopické textúry, ktoré sa vyskytujú najmä v monominerálnych sedimentárnych horninách: predovšetkým vo vápencoch, dolomitoch, kremencoch (napr. jurské vápence v oblasti krátera Steinheim

v Nemecku), ale aj v jemnozrnných magmatických a metamorfovaných horninách (napr. Rochecouart vo Francúzsku, Ries v Nemecku), alebo v bazaltoch (kráter Lonar v Indii). Tlakové postihnutie v týchto horninách vytvára typické kuželovité útvary s nápadnými systémami zbiehavých (radiálnych) puklín a plôch odlučnosti, dlhé desiatky cm až meter ***(obr. 14)***. Pokiaľ sú nárazové kužele v pôvodnej (autochtónnej) pozícií, z orientácie týchto puklín možno odvodiť smer šírenia šokovej metamorfnej vlny. Nárazové kužele vznikli v dôsledku impaktnej šokovej metamorfózy pri tlaku nad 3 GPa.

Obr. 14. *Nárazové kužele v granite Saint Gervais, impaktná štruktúra Rochecouart vo Francúzsku. Veľkosť vzorky cca 23 cm (Zdroj: www.impact-structures.com).*

Impaktné pseudotachylity sú produkty lokálneho tzv. frikčného tavenia silikátových hornín v dôsledku tlaku a trenia bezprostredne po dopade veľkých kozmických telies. Vytvárajú sa v komplexných kráteroch, kde miesta hornina je v dôsledku impaktu roztrhaná na nepravidelné úlomky, ktorých trhliny sú vyplnené veľmi rýchlo stuhnutou taveninou. Vynikajúce príklady impaktných pseudotachylitov poskytli obrovské prekambrické impaktné štruktúry Sudbury v Kanade a Vredefort v Juhoafrickej republike ***(obr. 15)***.

Impaktné sklá vznikli v dôsledku čiastočného až úplného roztavenia silikátových hornín a ich následného prudkého ochladenia. V dôsledku toho takmer neobsahujú vykryštalizované minerály, len amorfné prírodné silikátové sklo, prípadne úlomky nepretavených hornín a minerálov. Na rozdiel od impaktných pseudotachylitov, ktoré vznikli viac-menej in situ (na mieste) na puklinách materských hornín, materiál impaktných skiel bol vyvrhnutý do atmosféry a dopadol v oblasti impaktného krátera a jeho bezprostredného

okolia. Medzi impaktné sklá možno zaradiť aj tzv. irgizity a mikroirgizity, ktoré sú na prvý pohľad morfologicky podobné tektitom, avšak ich teplota vzniku je nižšia (do 1 300 °C), ako

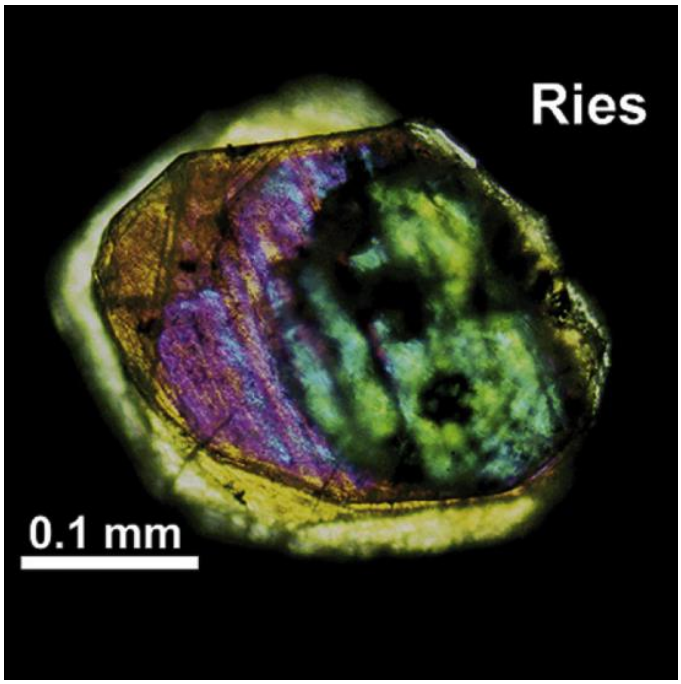
Obr. 15. *Odkryv impaktom rozbitej horniny s nepravidelnými žílami pseudotachylitu. Vredefort, Juhoafrická republika (Zdroj: www.impacr-structures.com).*

v prípade tektitov (najmenej 2 000 °C). Tektity a mikroskopické silikátové sféruly (guľôčky) vznikli podobným mechanizmom, ale ako menšie telesá kondenzovali a dopadli v podstatne väčších vzdialenostiach od materského impaktného krátera (tzv. distálne ejektá, podobnejšie v kap. 3).

2.3. Charakteristické minerály impaktnej šokovej metamorfózy

Diamant (C) je typomorfný minerál ultravysokotlakových podmienok, je stabilný od tlaku 3 GPa, pri vysokých teplotách sa však hranica jeho stability posúva k vyšším tlakom; pri teplote okolo 1 000 °C na cca 5 GPa, pri teplote 3 000 °C až na približne 15 GPa. Okrem dobre známych výskytov magmatických diamantov spätých s kimberlitmi a metamorfných diamantov z niektorých eklogitov a granulitov, kde diamant vzniká v zemskom plášti v hĺbkach približne 100 až 200 km, bola táto kubická modifikácia uhlíka zaznamenaná aj vo viacerých pozemských impaktných štruktúrach. Výskyty diamantov boli zaznamenané najmä z veľkých komplexných kráterov s priemerom nad 20 km, napr. Popigaj, Kara a Pučež-Katunki (Rusko), Ries (Nemecko), Sudbury (Kanada), alebo Lappajärvi (Fínsko). Boli však

identifikované aj v relatívne malých, jednoduchých impaktných kráteroch s priemerom okolo 4 km (Iľincy a Zapadnaja na Ukrajine). Impaktné diamanty tu vznikli bezprostredne po dopade kozmických telies vplyvom obrovských tlakov a teplôt na vhodné terčové horniny, najmä organickým uhlíkom alebo grafitom obohatené sedimenty a metamorfované sedimentárne horniny (napr. grafitické bridlice). Jedná sa o premenu grafitovej štruktúry na diamantovú v tuhom skupenstve (tzv. martensitickú transformáciu). Impaktné diamanty vznikli v priebehu zlomku sekundy až niekoľkých sekúnd, sú preto zvyčajne veľmi malé (obyčajne len niekoľko tisícin až stotín mm). Výnimkou sú však niektoré impaktné diamanty z krátera Popigaj, ktoré vzácne dosahujú veľkosť až 2 mm, prípadne diamant tu tvorí až 1 cm veľké agregáty. Diamanty z impaktných kráterov majú žltú, sivú až čiernu farbu, často kopírujú tabuľkový hexagonálny kryštálový habitus zdedený z grafitu a sú plné mikroskopických inklúzií grafitu, moissanitu (SiC) a iných minerálov. Diamanty v impaktných štruktúrach bývajú niekedy opticky anomálne dvojlomné ***(obr. 16)***, s dvojčatnými ryhami, častými trhlinami a korodovaným povrchom vplyvom extrémne vysokých teplôt impaktnej taveniny. Určite nie sú preto vhodné ako materiál na klenotnícke účely (brúsenie briliantov).



Obr. 16. *Impaktný diamant s výrazným anomálnym dvojlomom z krátera Ries v Nemecku (Zdroj: www.geopark-ries.de).*

Najznámejšia lokalita impaktných diamantov je oblasť krátera Popigaj na severnej Sibíri v Rusku. Jedná sa o veľmi dobre zachovalý kráter s priemerom asi 100 km, starý len

okolo 35 Ma (paleogén), kde boli v roku 1972 opísané aj prvé nálezy diamantov nepochybne impaktného pôvodu. Je tu najväčšia známa koncentrácia impaktných diamantov v pozemských kráteroch; meteorit (pravdepodobne chondrit typu L – podrobnejšie kap. 4.2) tu narazil do granáticko-biotitických pararúl s zvýšeným obsahom grafitu. Pri šokovej metamorfóze týchto hornín vzniklo obrovské ložisko diamantov s veľkým ekonomickým významom. Navyše popigajské diamanty vykazujú lepšie fyzikálne vlastnosti ako klasické diamanty získavané z kimberlitov, sú tvrdšie a veľmi vhodné ako priemyselné abrazívum. Celkové zásoby diamantovej suroviny v kráteri Popigaj sú dokonca väčšie, ako všetky ostatné zásoby ekonomicky využiteľných diamantov vo svete (!). Našťastie kráter Popigaj bol ako svetový unikát zapísaný ako súčasť Svetového kultúrneho a prírodného dedičstva UNESCO a je tak chránený pred prípadnou ťažbou diamantov.

Coesit a stišovit (SiO_2) sú vysokotlakové (a čiastočne aj vysokoteplotné) modifikácie kremeňa. Coesit vzniká pri tlakoch od 3-12 GPa, stišovit je však stabilný pri ešte vyšších tlakoch, cca 10-60 GPa ***(obr. 11)***. Obe vysokotlakové modifikácie sa vyznačujú kryštálovými štruktúrami s tesnejšie usporiadanými atómami Si a O, čoho dôsledkom je aj vyššia hustota monoklinického coesitu (2,85 – 3,01 g/cm^3) a najmä tetragonálneho stišovitu (4,3 g/cm^3) oproti bežnému kremeňu s 2,65 g/cm^3. Zastúpenie coesitu a stišovitu oproti kremeňu však býva aj vo veľkých impaktných štruktúrach pomerne nízke (obvykle len stotiny až desatiny %, lokálne 1 až 5 %); prevláda drvený a šokovo metamorfovaný, prípadne až amorfizovaný kremeň.

Akaogiit je ultravysokotlaková monoklinická modifikácia TiO_2, ktorá bola identifikovaná v úlomku granátovo-cordieritovo-sillimanitovej ruly v suevitickej brekcii kráteru Ries (Nemecko). Vznikol vplyvom šokovej metamorfózy a transformácie pôvodného rutilu. Podobne ako reidit voči zirkónu, aj akaogiit má zhruba o 12 % vyššiu hustotu (4,72 g/cm^3), ako rutil. Akaogiit tu vystupuje v asociácií s ďalšími minerálmi – produktami šokovej metamorfózy, napr. prechodnou fázou medzi grafitom a diamantom, jadeitom a vysokotlakovou modifikáciou $FeTiO_3$. Na základe uvedenej asociácie sa predpokladá tlak do 22 GPa a post-šoková teplota do 500 °C.

Niklom a chrómom bohaté spinely $(Ni,Mg)(Cr,Fe,Al)_2O_4$ boli opísané zo sférických (guľovitých) impaktných skiel v archaických, 3,2 až 3,5 Ga starých metamorfovaných horninách v oblasti Barberton (Juhoafrická republika) a Pilbara (Austrália). Impaktné horizonty sú charakteristické výskytom sférul 0,5 až 2 mm veľkých, ktoré obsahujú do 40 % spinelu s vysokými obsahmi Ni a Cr (zvyčajne cca 15 – 35 hmot. % oxidov týchto prvkov).

Takéto typy spinelov sa v bežných pozemských magmatických a metamorfovaných horninách nevyskytujú.

Reidit predstavuje ultravysokotlakovú modifikáciu $ZrSiO_4$, ktorá bola nájdená v šokovo postihnutom zirkóne, ktorý je bežnou prírodnou formou $ZrSiO_4$. Hoci obe modifikácie sú tetragonálne, hustota reiditu (5,2 g/cm^3) je o 11 % vyššia ako v prípade zirkónu (4,6 – 4,7 g/cm^3). Reidit bol opísaný napr. z paleogénnych (eocénnych) vrstiev s impaktnými úlomkami vo vrtoch na podmorskom kontinentálnom svahu v oblasti New Jersey (USA) a z ostrova Barbados v Atlantickom oceáne. Šokovo postihnuté kryštály zirkónu obsahujú početné planárne trhliny, vyplnené kostrovitými, len 10 x 0,3 μm veľkými kryštálmi reiditu. Na základe experimentálnych prác dochádza k transformácií zirkónu na reidit pri tlakoch 30 až 53 GPa, pričom pole stability reiditu je až do 90 GPa. Predpokladá sa, že šokovo metamorfované zirkóny s prítomnosťou reiditu geneticky súvisia s neďalekým impaktným kráterom Chesapeake Bay (priemer cca 90 km, vek 35,7 Ma), ktorý sa nachádza na kontinentálnom svahu na pobreží Virgínie v USA. Transformácia zirkónu na reidit bola zistená aj v impaktom postihnutých brekciach v samotnom kráteri Chesapeake Bay, ako aj v kráteri Ries v Nemecku.

3. TEKTITY

3.1. Definícia a genéza tektitov

Termínom ***tektity*** označujeme silikátové sklovité horniny (hmoty), ktoré vznikli prudkým roztavením a vyparením pozemských silikátových hornín v dôsledku extrémne vysokých teplôt v mieste dopadu veľkých kozmických telies (asteroidov) a ich následnej prudkej kondenzácií. K roztaveniu až vypareniu (vaporizácií) týchto pozemských hornín, prípadne pôdy, dochádza ešte tesne pred samotným okamžikom dopadu asteroidu a tvorbou šokovej ultravysokotlakovej vlny. Dopadajúci asteroid totiž pred sebou vytváral vrstvu stlačeného horúceho vzduchu, pričom teploty lokálne dosiahli najmenej 2000 až 3000 °C, teda hodnoty, pri ktorých sa silikátové horniny okamžite roztavia a vyparia.

Prvá písomná zmienka o tektitoch sa nachádza v staročínskom texte od Liu Suna z obdobia okolo roku 950, ktorý opisuje čierne kamene, ktoré nachádzali ľudia na polostrove Lej-čou-pan-tao (Leizhou Bandao) na juhovýchode Číny tesne po výdatných búrkach a dažďoch. Pre európsku a svetovú vedu mal však prvoradý význam objav vltavínov (moldavitov) v južných Čechách, v povodí rieky Vltavy (nemecky Moldau), profesorom pražskej univerzity Josefom Mayerom koncom 18. storočia (1786). Neskôr boli tektity nájdené na Morave, ale aj na viacerých lokalitách a celých oblastiach v zahraničí (USA, Kuba, Austrália, Thajsko, Vietnam, Laos, Kambodža, Filipíny, Indonézia, Pobrežie Slonoviny, Rusko, Kazachstan a inde). Od začiatku skúmania záhadných silikátových skiel a zvlášť vltavínov sa viedli diskusie o ich vzniku. Uvažovalo sa, že vltavíny pochádzajú z rúl, špekulovalo sa o ich vulkanickom pôvode (špecifické obsidiány), alebo že sa jedná o zvláštne sklovité meteority, alebo vyvrhnuté a na Zem dopadnuté produkty sopiek na Mesiaci, či mesiacov Jupitera alebo Saturnu, resp. že ide o produkty silných bleskových výbojov. Časť bádatelov sa spočiatku dokonca domnievala, že tektity sú umelé, človekom vytvorené produkty zo stredovekých sklární.

Až podrobné mineralogické a geochemické štúdium v 60. až 70. rokoch 20. storočia jednoznačne preukázalo prírodný a pozemský pôvod tektitov, avšak v úzkej genetickej väzbe na impakty relatívne veľkých kozmických telies (asteroidov). Znamená to, že každý špecifický región výskytu tektitov, tzv. pádová oblasť (rádovo desiatky, stovky až milióny km^2 veľká), musí logicky mať svoj „materský“ impaktný kráter. A materské krátery tektitov sa intenzívne hľadali a boli väčšinou naozaj aj identifikované. Práve nápadná geochemická

podobnosť a vek impaktom postihnutých hornín v mieste dopadu telies so zložením príslušných tektitov sú hlavnými dôkazmi impaktovej teórie ich vzniku. Väčšina pádových oblastí tektitov sa však nenachádza v blízkosti materského impaktného krátera, ale vo vzdialenosti stoviek až tisícov kilometrov od neho. Napríklad pádová oblasť českých a moravských vltavínov (oblasť Chebu, južné Čechy, južná Morava, severo-východné Rakúsko) je vzdialená približne 250 až 350 km od ich materského kráteru Ries v Nemecku. Pádová oblasť austrálsko-ázijských tektitov je vo vzdialenosti až 10 tisíc km od možného (doteraz neznámeho) krátera pravdepodobne v juhovýchodnej Ázii a tektity severoamerickej pádovej oblasti boli zistené v celej karibskej oblasti až po Venezuelu, približne 4 tisíc km od materského krátera Chesapeake Bay vo Virgínií na východnom pobreží USA. Tektity môžeme preto označiť aj ako tzv. distálne ejektá (vzdialený vyvrhnutý materiál), na rozdiel od impaktných hornín in situ (na mieste dopadu), resp. v malej vzdialenosti od dopadu vesmírneho projektilu.

Po roztavení až vyparení miestnych silikátových hornín v dôsledku impaktu došlo k silnému vymršteniu a rozptýleniu tohto materiálu do atmosféry, do výšky niekoľko kilometrov. A keďže horné vrstvy atmosféry sú veľmi chladné (až do -50 °C), horúci mrak, plný roztaveného až vaporizovaného materiálu, sa prudko ochladzuje a vzápätí kondenzuje na tuhú sklovitú silikátovú hmotu. Súčasne značná kinetická energia po dopade asteroidu spôsobuje, že kondenzujúci sklovitý materiál (vznikajúce tektity) preletí značnú vzdialenosť od miesta dopadu asteroidu. Počas rýchleho preletu atmosfétou (okolo 4 - 5 km/s) dochádza k silnému treniu, druhotnému silnému zahriatiu, čiastočnému vytavovaniu letiaceho materiálu (ablácií) po jeho okrajoch a tvorbe tzv. ablačného lemu alebo typického kvapkovitého tvaru tektitu ***(obr. 16)***.

Obr. 16. Vľavo: *Tektit (australit) s ablačným lemom, Západná Austrália. Rozmery: 21 x 11 mm (Zdroj: www.australites.com).* ***Vpravo:*** *Kvapkovitý tvar tektitu (indočínitu). Zhanjiang, Čína. Rozmery: 45 x 22 mm. Materiál autora. Foto: Jarmila Uhrová Kernová.*

Napokon po páde a vychladnutí tektitu na povrchu pádovej oblasti na pevnine alebo na dne mora či oceánu sa tektity stávajú súčasťou sedimentárnych, tektitmi obohatených vrstiev v rámci sedimentárnej sekvencie. Silikátové sklá však podliehajú erózii, mechanickej abrázii a najmä pomalému chemickému rozpúšťaniu. Preto je povrch najmä starších tektitov viac alebo menej alterovaný v dôsledku dlhodobého čiastočného rozpúšťania. Vzniká tak typická, avšak často veľmi estetická skulptácia povrchu tektitov. Typickým príkladom sú juhočeské vltavíny, ktoré majú vek približne 15 Ma (neogén, miocén), a počas dlhodobého rozpúšťania pôsobením slabo mineralizovanej vody nadobudli svoju charakteristickú hlbokú skulptáciu ***(obr. 17)***, pričom väčšia časť z nich sa už pravdepodobne úplne rozpustila, alebo mechanicky rozpadla v dôsledku sedimentárneho transportu. Predpokladá sa, že z pôvodných tvarov vltavínov bola počas doby ich uloženia v sedimentoch chemicky odleptaná 2 až 7 mm hrubá vrstva. Podobne podľahli korózii aj najstaršie známe paleogénne tektity z USA (georgianity a bediasity z juhozápadnej časti USA; 35,7 Ma staré), alebo urengoity z Ruska, staré 24 Ma. Naopak, oveľa mladšie, pleistocénne tektity (len cca 0,7 až 1,1 Ma) z Austrálie a juhovýchodnej Ázie (australity, filipínity, indočínity atď.), alebo z Pobrežia Slonoviny v strednej Afrike (ivority) si viac-menej zachovali svoj pôvodný tvar a veľkosť, pričom ich druhotná skulptácia je vyvinutá v oveľa menšej miere.

Obr. 17. *Hlboká skulptácia povrchu tektitu (vltavínu) vplyvom dlhodobého rozpúšťania. Besednice – Ježkovna, Česko. Rozmery: 30 x 16 mm. Materiál autora. Foto: Jarmila Uhrová Kernová.*

Neprekvapuje preto, že najväčšie zachované tektity sú práve relatívne najmladšie, pleistocénne indočínity (austrálsko-ázijská pádová oblasť). Odtiaľto boli zistené aj najväčšie známe tektity, vrstevnaté **indočínity typu Muong Nong**, pochádzajúce z Thajska a Laosu ***(obr. 18)***, pričom jeden opísaný exemplár dosahuje veľkosť futbalovej lopty a má hmotnosť až 12,8 kg, avšak údajne boli v tejto oblasti nájdené tektity s hmotnosťou 24 až 29 kg.

Obr. 18. *Veľký vrstevnatý tektit typu Muong Nong z Laosu. Veľkosť okolo 25 cm, hmotnosť 3,5 kg (Zdroj: www.meteorite-times.com).*

Predpokladá sa, že tento typ veľkých tektitov s vrstevnatou textúrou (Muong Nong) dopadol relatívne najbližšie od materského impaktného kráteru a vo vzdialenejších oblastiach dopadali stále menšie a menšie tektity. České a moravské vltavíny (moldavity) dosahujú veľkosť maximálne 265 g (podľa neoverených údajov až do 500 g), obvykle len do 10-20 g, pričom sa zväčša jedná o úlomky pôvodných kvapkovitých tektitov (nazývaných aj celotvary). Vyskytujú sa aj tzv. mikrotektity, teda tektity drobných až mikroskopických rozmerov (pod 1 mm), ktoré sa vo veľkých množstvách vyskytujú napr. v oceánkych sedimentoch Indického oceánu medzi Austráliou a ostrovom Madagaskar (patria do skupiny austrálsko-ázijských tektitov), alebo na ostrove Barbados v severnej Amerike. Väčšina makroskopických tektitov na súši sa však našla na povrchu, resp. v klastických sedimentoch v neveľkých hĺbkach (maximálne do 10 m). Uvedená relatívne nízka chemická a mechanická stabilita tektitov je príčinou, že vek najstarších známych tektitov je len okolo 36 Ma a pravdepodobné staršie sklá už úplne podľahli chemickému rozpúšťaniu a mechanickému rozpadu.

3.2. Fyzikálne vlastnosti a zloženie tektitov

Tektity sú obyčajne priehľadné až priesvitné, väčšie exempláre nepriehľadné, s rôznymi odtieňmi zelenej, hnedej až čiernej farby a skleným až matným leskom. Rôznu farbu tektitov spôsobujú varírujúce koncentrácie Fe, Mn, Cr a Ni. Najčastejšiu fľašovo zelenú farbu tektitov spôsobuje najmä Fe^{2+}, sýtejšie zelené odtiene aj Cr^{3+} a Ni^{2+}. Zvýšená koncentrácia Fe^{3+}, resp. vyšší pomer Fe^{3+}/Fe^{2+} sa prejavuje hnedým až čiernym sfarbením tektitov. Tektity majú sklený lesk s indexom lomu v intervale 1,48 až 1,54 a hustotou 2,30 až 2,51 g/cm^3.

Tektity ako prírodné sklá sa vyznačujú sklovitou fluidálnou textúrou, ktorá býva zvýraznená nepravidelnými uzavreninami kremenného skla o rozdielnom zložení, tzv. šlírami. V niektorých prípadoch tektity obsahujú aj mikroskopické uzavreniny (inklúzie) lechatelieritu (do 0,1 mm veľké), amorfnej hmoty so zložením blízkym čistému SiO_2. Lokálne boli v tektitoch zistené aj inklúzie baddeleyitu (ZrO_2), ktorý vznikol termálnym rozpadom zirkónu, coesit, ako aj guľovité inklúzie minerálov, typických pre meteority: zliatiny Ni-Fe, schreibersit $(Fe,Ni)_3P$, troilit FeS. Vo vrstevnatých veľkých tektitoch typu Muong Nong boli naviac zistené aj minerály pozemského pôvodu (kremeň, tridymit, cristobalit, korund, rutil, chromit, zirkón, monazit), ktoré boli inkorporované do roztaveného tektitového skla.

Pre chemické zloženie tektitov sú charakteristické vysoké obsahy SiO_2, obvykle v intervale 63 až 83 hmot. %, ktoré sú analogické kyslým magmatickým horninám (tonality až granity, dacity až ryolity) a metapelitickým až metapsamitickým metamorfovaným horninám (bežné fylity, svory, ruly, migmatity, granulity). Obsahy Al_2O_3 varírujú v rozmedzí zhruba 8 až 16 hmot. %. Pomerne veľké variácie v zložení tektitov jednotlivých pádových oblastí ukazujú koncentrácie FeO MgO, CaO, Na_2O, K_2O, ako aj stopových prvkov.

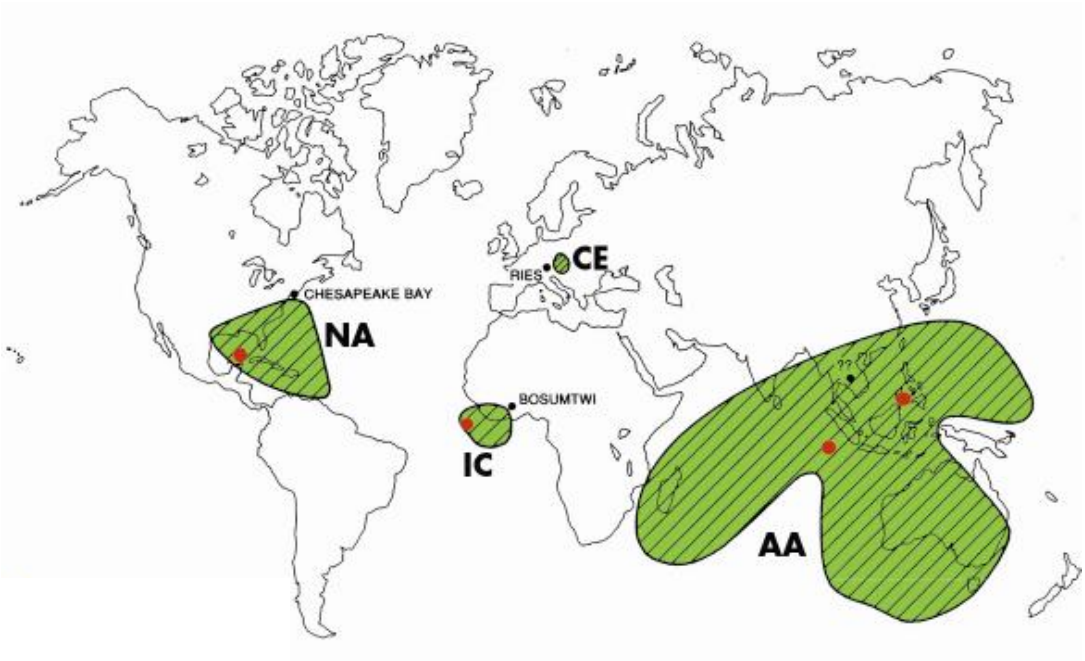
Medzi hlavné argumenty impaktného pôvodu tektitov patrí podobnosť ich chemického zloženia so zložením hornín, príp. pôdy v mieste dopadu kozmického telesa. Lokálne rozdiely v chemickom zložení tektitov sú odrazom zloženia špecifických pôvodných pozemských hornín v mieste dopadu asteroidu, ktoré sa vyparili a následne kondenzovali. Je však samozrejmé, že v dôsledku geochemicky odlišných vlastností Si, Al a napr. alkalických prvkov (Ca, Na a K) je výsledné zloženie tektitu – produkt kondenzácie iné, ako pôvodných hornín v mieste impaktu. Počas pretavenia a následnej kondenzácie sa môžu meniť aj vzájomné pomery niektorých prvkov, napr. Na/K, Ca/Na. Avšak vzájomné pomery geochemicky podobných, ťažko tekavých a geochemicky menej pohyblivých, najmä stopových prvkov (napr. REE, Zr, Hf, Ir, Pt, Ti, Cr), ich pomerov (napr. Ni/Co, Fe/Ni, Ni/Co,

Zr/Hf) a pomerov izotopov H, Sr, Pb atď., zostávajú viac-menej zachované v pôvodnej terčovej hornine aj tektite. Súčasne chemické zloženie jasne svedčí o pozemskom (terestrickom) pôvode tektitov a vylučuje ich zdroj napr. z Mesiaca, Marsu alebo iných mimozemských telies. Treba totiž podotknúť, že aj v mesačnej pôde (regolite) boli objavené impaktové a vulkanické sklá, ktoré však majú špecifické chemické zloženie, podobné materským mesačným bazaltom a anortozitom.

3.3. Svetové výskyty tektitov

Tektity boli doteraz opísané zo štyroch hlavných pádových oblastí ***(obr. 19)***:

1. severoamerická
2. stredoeurópska
3. stredoafrická
4. austrálsko-ázijská.



Obr. 19. *Hlavné pádové oblasti tektitov a ich materské impaktné krátery: severoamerická (NA) – Chesapeake Bay, stredoeurópska (CE) – Ries, stredoafrická (IC) – Bosumtwi a austrálsko-ázijská (AA) – doteraz neznámy kráter (Zdroj: www.esrf.eu).*

Okrem nich sú známe ojedinelé nálezy tektitov v oblasti Urengoj na Sibíri a tektitom podobné sklá z oblasti impaktného krátera Žamanšin v Kazachstane, ktoré však zodpovedajú skôr

lokálnym impaktným horninám a nie tektitom ako distálnym ejektám, teda hmotám vzdialeným od materských kráterov.

Tektity severoamerickej pádovej oblasti sa nachádzajú najmä v štátoch pri východnom (atlantickom) pobreží USA (Georgia, Texas, Massachusetts), ako aj na ostrovoch Kuba a Barbados. Podľa lokalít nálezov sa označujú aj ako **bediasity** (podľa indiánskeho kmeňa v Texase), alebo **georgianity** (podľa štátu Georgia) – ***obr. 20***. Severoamerické tektity sa

Obr. 20. Vľavo: *Tri exempláre bediasitov. Veľkosť 2,5 – 3 cm. Brazis County, Texas, USA (Zdroj: www.tektites.uk).* ***Vpravo:*** *Georgianit, Georgia, USA. Hmotnosť 57 g (Zdroj: www.meteoriteassociationofgeorgia.org).*

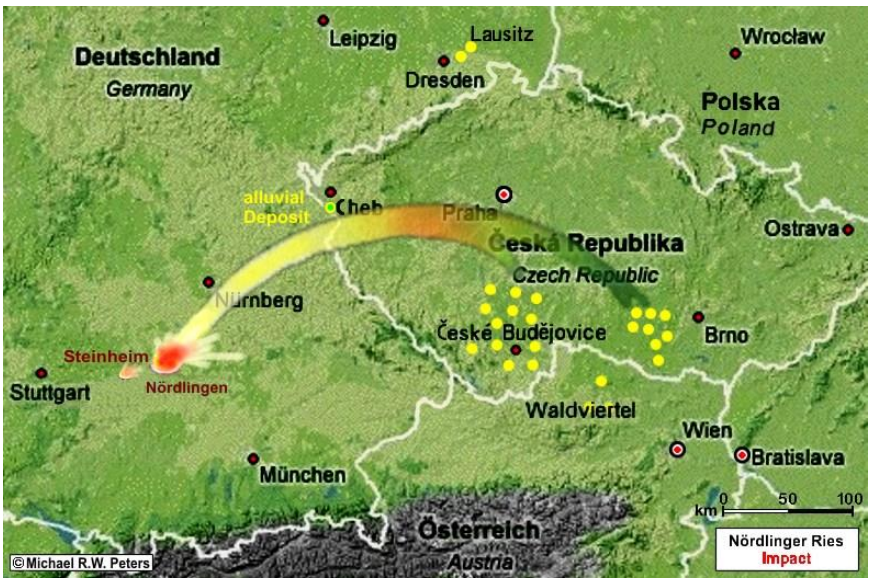
nachádzajú väčšinou v sedimentárnych štrkových formáciach, prípadne na bázi tufitických hornín. Zaujímavá je systematická zmena chemického zloženia severoamerických tektitov: obsahy SiO_2 a K_2O sú najvyššie v severne položených výskytoch (Massachusetts, Georgia) a smerom na juh klesajú, a naopak obsahy Al_2O_3, FeO a Na_2O stúpajú od severne uložených georgianitov po južne položené bediasity. Veľmi nízky pomer Fe^{3+}/Fe^{2+} svedčí o fakte, že pôvodný materiál musel byť roztavený pri veľmi vysokých teplotách a súčasne redukčných podmienkach. Na základe chemického zloženia severoamerických tektitov sa predpokladá, že ich protolitom (pôvodnou horninou) boli najpravdepodobnejšie arkózové pieskovce. Predpokladá sa, že celkove dopadlo rádovo 10^{10} t (desiatky miliárd ton) severoamerických tektitov. Dlhú dobu bol nejasný ich materský impaktový kráter, predpokladal sa napr. veľký ruský kráter Popigaj. Až v 90. rokoch 20. storočia bol objavený mohutný impaktný kráter v zátoke Chesapeake Bay, východne od Washingtonu v štáte Virgínia s priemerom okolo 90 km, ktorého vek bol spresnený na 35,67 ± 0,28 Ma (^{40}Ar-^{39}Ar datovanie), čo je v dobrej zhode s datovaním severoamerických tektitov.

Tektity stredoeurópskej pádovej oblasti sú označované ako **vltavíny**, resp. moldavity, podľa najvýznamnejšieho regiónu ich výskytu – povodí rieky Vltava (nemecky Moldau) v južných Čechách. V južných Čechách sú náleziská vltavínov lokalizované najmä do cca 80 km dlhého a 5 až 15 km širokého pruhu smeru SZ-JV zhruba od mesta Písek po obec Byňov. Druhý významný región výskytu vltavínov je južná Morava, medzi Třebíčom, Moravskými Budějovicami, Znojmom a Ivančicami. Vltavíny sa však ojedinele našli aj na priľahlej rakúskej strane. Len pomerne nedávno (v r. 1993) boli drobné vltavíny (do 10 g) opísané aj z okolia mesta Cheb v západných Čechách. Je zaujímavé, že vyše 100 exemplárov vltavínov bolo nájdených aj pomerne ďaleko na severe – v okolí nemeckého mesta Drážďany (Dresden). Vyskytujú sa tu v terasových štrkovitých náplavoch rieky Labe (Elbe), pričom nie je doteraz jasné, či sa jedná o samostatné pádové pole vltavínov, alebo tam boli transportované riekami Vltava a Labe z pôvodnej pádovej oblasti v južných Čechách. Vltavíny sa nachádzajú v neogénnych až pleistocénnych štrkových alebo piesčitých, lokálne aj ílovitých sedimentoch, ako aj v kvartérnych hlinitých sedimentoch (pôdach) – ***obr. 21***.

Obr. 21. *Vltavín (tmavozelený) v štrkopieskovom sedimente. Lokalita Chlum pri obci Ločenice v južných Čechách. Veľkosť vltavínu: 25 x 18 mm. Materiál a foto autor.*

Doteraz sa našlo vyše 300 tisíc exeplárov vltavínov. Je to však určite len zlomok ich pôvodného množstva, väčšia časť z nich sa pravdepodobne nenávratne rozpustila alebo mechanicky zničila počas transportu a relatívne dlhodobej sedimentácie. Odhaduje sa, že pôvodná hmotnosť roztaveného až vypareného a opätovne stuhnutého vltavínového skla bola

približne 3 000 ton, čo predstavuje kompaktnú kocku s rozmerom hrany 10,85 m s priemernou hustotou 2,35 g/cm^3. Je však možné, že tento údaj je výrazne podcenený, práve v dôsledku denudácie a zničenia veľkej väčšiny vltavínového materiálu. Pre vltavíny je typická dobre vyvinutá skulptácia, ktorá vznikla naleptaním pôvodného povrchu, výrazná zelená farba a sklený lesk, čo predurčuje ich využitie ako šperkárskeho drahého kameňa. Materský impaktný kráter vltavínov sa podarilo preukázať na základe geochemickej podobnosti ako aj veku miestnych hornín a vltavínov; je ním impaktný kráter Ries s priemerom 24 km a blízky satelitný kráter Steinheim (priemer 3,5 km) v južnom Nemecku, v oblasti mesta Nördlingen (približne 270 km ZJZ od Českých Budějovíc). Okrem iných geochemických podobností bola zistená výborná zhoda pomerov izotopov stroncia vo vltavínoch ($^{87}Sr/^{86}Sr$ = 0,7208 – 0,7224) a v ílovitom piesku z krátera Ries ($^{87}Sr/^{86}Sr$ = 0,7215 – 0,7228). Vek vltavínov zodpovedá veku suevitov z krátera Ries a bol najnovšie stanovený pomocou izotopového ^{40}Ar-^{39}Ar datovania na 14,83 ± 0,15 Ma, čo stratigraficky zodpovedá mladšiemu terciéru (neogénu), presnejšie strednému miocénu. Predpokladá sa, že mohlo ísť o dopad asteroidu, zloženia zrejme kamenného meteoritu (chondritu), s priemerom cca 1 km a hmotnosťou okolo 1,5 miliardy ton. Na základe počítačového modelovania sa zistilo, že vesmírne teleso dopadlo s rýchlosťou 20 km/s od ZJZ pod uhlom cca 30° na horizontom. Územie s výskytmi vltavínov vytvára vejarovitý tvar so vzdialenosťou do 400 km od miesta dopadu asteroidu – kráteru Ries ***(obr. 22)***.



Obr. 22. *Mapa vyznačujúca dopad asteroidu do oblasti Nördlingenu (krátery Ries a Steinheim v Nemecku), smer transportu roztaveného a neskôr utuhnutého sklovitého materiálu s následným dopadom tektitov (vltavínov) najmä do oblasti južných Čiech a Moravy (Zdroj: www.realgems.org).*

Tektity stredoafrickej pádovej oblasti sú označované ako **ivority**, podľa miesta nálezov v štáte Pobrežie Slonoviny (anglicky Ivory Coast). Okrem nálezov na pobreží afrického kontinentu boli mikroskopické ivority (mikroivority) identifikované aj v sedimentoch priľahlého Guinejského zálivu Atlantického oceánu. Hlavným náleziskom je oblasť Ouellé, kde boli ivority nachádzané v zlatonosných štrkovitých sedimentoch. Stredoafrické tektity majú oválne, tyčinkovité až kvapkovité tvary bez výraznejšej skulptácie, sú silne lesklé, čiernej farby, pričom na tenkých úlomkoch presvitajú do hneda ***(obr. 23)***. Predpokladá sa, že celkove dopadlo rádovo 10^7 t ivoritov (desiatky miliónov ton). Za materský kráter ivoritov možno s najväčšou pravdepodobnosťou označiť impaktnú štruktúru Bosumtwi v susednej stredoafrickej Ghane s priemerom 10,5 km. Vek krátera Bosumtwi bol stanovený približne na 1,07 Ma, čo veľmi dobre koreluje s výsledkami ^{40}Ar-^{39}Ar datovania ivoritov (1,13 ± 0,10 Ma).

Obr. 23. *Ivorit, tektit z Pobrežia Slonoviny (Zdroj:www.meteorite-times.com).*

Tektity austrálsko-ázijskej pádovej oblasti sú rozptýlené na najväčšej ploche v rámci známych svetových pádových oblastí tektitov ***(obr. 19)***. Boli zistené na obrovskej ploche, väčšej ako 50 miliónov km^2 (vyše 10 % zemského povrchu !), ktorá zahŕňa Austráliu, juhovýchodnú Áziu (južná Čína, Vietnam, Laos Kambodža, Thajsko, Barma, Malajzia, Indonézia, Filipíny), až po južný cíp Indie a ostrov Madagaskar. Okrem nálezov na kontinentoch boli zistené najmä mikrotektity aj v rozsiahlych oblastiach Indického oceánu až po JZ časť Tichého oceánu. Podľa jednotlivých čiastkových nálezových oblastí sú tektity austrálsko-ázijskej pádovej oblasti nazývané ako **australity, indočínity, thajlandity,**

malajzianity, javanity, billitonity alebo **filipínity**. Vyskytujú sa priamo na povrchu, resp. plytko v pôdnom profile, ako aj v aluviálnych náplavoch a piesočných dunách (australity), inokedy v štrkoch, pieskoch, alebo zveralinových plášťoch magmatických hornín (indočínske tektity), vždy v mladých kvartérnych sedimentoch. V rámci tejto obrovskej pádovej oblasti sa austrálsko-ázijské tektity líšia svojim tvarom, veľkosťou, textúrou, a vykazujú variácie chemického zloženia, hlavne v obsahoch Fe, Mg a Ca. Medzi austrálsko-ázijskými tektitmi nachádzame širokú morfologickú rozmanitosť, od obrovských vrstevnatých exemplárov typu Muong Nong v juhovýchodnej Ázií (hmotnosť lokálne niekoľko kg) – ***obr. 18***, cez menšie kvapkovité a guľovité tektity (Austrália, JV Ázia), menšie diskovité australity tvaru gombíka s typickými ablačnými lemami (Austrália) – ***obr. 16***, až po mikrotektity, ktoré boli nájdené v sedimentoch dna Indického a Tichého oceánu. Napriek určitým rozdielom v chemickom zložení majú austrálsko-ázijské tektity aj niektoré spoločné geochemické charakteristiky (napr. zhodné pomery $^{87}Sr/^{86}Sr$ = 0,7102 – 0,7120), ktoré poukazujú, že vznikli pravdepodobne pretavením klastogénnych sedimentárnych hornín, najskôr charakteru ílovitých pieskovcov až piesčitých bridlíc, prípadne drobových pieskovcov. Geochronologické datovanie austrálsko-ázijských tektitov je v dobrej zhode s geologickým umiestnením; poskytlo vek okolo 800 tisíc rokov (uvádzajú sa aj hodnoty 690 000 rokov pre tektity JV Ázie a 830 000 rokov pre australity), teda stredný pleistocén. Odhaduje sa, že celkové množstvo dopadnutých tektitov austrálsko-ázijskej oblasti bolo rádovo 10^8 t (stovky miliónov ton).

Záhadou však ostáva materský impaktný kráter austrálsko-ázijských tektitov. A to napriek faktu, že tieto tektity sú geologicky najmladšie, ako aj ich rozsiahlemu plošnému rozšíreniu, ktoré indikuje obrovský impakt a množstvo dopadnutého materiálu. Impaktný kráter by teda mal byť relatívne veľký, s priemerom aspoň 10 – 20 km a vzhľadom na jeho mladý (pleistocénny) vek mal byť dobre zachovaný. Do úvahy by mohol pripadať impaktný kráter Žamanšin v Kazachstane s priemerom 14 km, starý 0,9 ± 0,1 Ma, vzdialený cca 7 tisíc km od severnej hranice pádovej oblasti austrálsko-ázijských tektitov. Existuje dokonca geochemická podobnosť medzi impaktnými sklami lokalizovanými priamo v kráteri Žamanšin (irgizitmi) a austrálsko-ázijskými tektitmi, najmä javaitmi. Materský kráter by však mohol byť lokalizovaný aj niekde v severnej oblasti ich rozšírenia v JV Ázií, kde sa vyskytujú najväčšie tektity typu Muong Nong, o ktorých sa predpokladá, že boli najbližšie k impaktu. Potvrdzuje to aj fakt, že pomer izotopov Sr z týchto veľkých tektitov z Thajska ($^{87}Sr/^{86}Sr$ = 0,7175 – 0,7191) je nápadne podobný na hodnoty v okolitých pôdach (0,7182 – 0,7207).

4. Meteority

4.1. Definícia, dopad a veľkosť mikrometeoritov a meteoritov

Ako už bolo spomenuté, naša planéta, tak ako každé kozmické teleso, je od svojho vzniku neustále bombardovaná kozmickým (extraterestriálnym) materiálom. Impakty extraterestriálnych telies boli najintenzívnejšie počas zhruba prvých 500 Ma od vzniku Zeme ako planéty, pričom tento kozmický materiál sa podieľal na stavbe a geologickej evolúcií našej planéty, život nevynímajúc. Odhaduje sa, že denne dopadne na Zem okolo 270 ton kozmického materiálu, čo činí takmer 3 kg za sekundu (alebo cca 0,5 gramu na každý km^2 zemského povrchu za deň). Samozrejme, jedná sa skoro výlučne o najmenšie kúsky medziplanetárnej hmoty, s rozmermi rádovo 1 – 50 mikrometrov (μm = 10^{-3} mm) a s hmotnosťou menšou ako 1 mg (0,001 gramu), ktoré sú označované ako **medziplanetárne prachové častice** (označované aj ako **IDP** – *interplanetary dust particles*), alebo **mikrometeority**. Tieto drobné telieska neustále dopadajú na Zem bez toho, že by sme si to všimli, pretože sú príliš malé na to, aby spôsobili nejaké výrazné svetelné alebo zvukové efekty. Ich prítomnosť však dokazuje tzv. zodiakálne svetlo, viditeľné na čistej nočnej oblohe pred a po západe Slnka, ktoré sa prejavuje ako eliptický útvar, svetlejší ako zvyšok tmavej oblohy. Tento jav spôsobuje slnečné svetlo odrazené od obrovského množstva mikroskopických IDP. Avšak aj tieto mikroskopické častice pri zrážke na pevné teleso vyhĺbia drobné impaktné krátery, obyčajne s priemerom do 0,5 mm. Takéto drobné krátery boli identifikované na kozmických lodiach na obežnej dráhe Zeme, bombardovaných týmto kozmickým prachom.

Dráhu letu väčších kozmických teliesok, s veľkosťou od 50 μm do niekoľkých cm, už môžeme pozorovať voľným okom. Jedná sa o tzv. **meteoroidy**. Pri lete týchto častíc ovzduším dochádza k silnému treniu v hustých vrstvách atmosféry, pričom meteoroid zhorí skôr, než dosiahne zemský povrch. Pri tomto krátkom úkaze (obyčajne iba 1 až 2 sekundy) unikajúca sublimujúca („horiaca“) hmota meteoroidu vydáva jasné svetlo, viditeľné na nočnej oblohe. Tento svetelný fenomén označujeme ako **meteor**, ľudovo sa označuje aj ako „padajúce hviezdy“. Okrem sporadických meteorov (náhodný smer letu) možno pravidelne každý rok v presne vymedzenom časovom intervale (hodiny, dni až týždne) pozorovať prechod Zeme prúdmi meteoroidov pohybujúcich sa v približne rovnakých dráhach pri pohybe okolo Slnka, tzv. **meteoritickými rojmi** (napr. Kvadrantidy 3.-4. januára, Perseidy

10.-15. augusta, Leonidy 16.-18. novembra). Ich materskými telesami sú kométy. Výnimočne dochádza k veľmi silným meteorickým rojom, pripomínajúcim hustý dážď. Napríklad počas aktivity Leoníd v noci 16.-17. novembra 1966 bola spočítaná hodinová frekvencia meteorov v maxime aktivity roja až na 150 tisíc.

Väčšie meteoroidy (približne od 10 cm) už majú väčšiu šancu, že časť z nich prežije prelet atmosfétou a dopadne na povrch Zeme. Tieto kozmické telesá silikátového až kovového železo-niklového zloženia, ktoré dopadajú na Zem, označujeme ako **meteority**. Pri dopade meteoritov okrem zemskej gravitácie zohráva významnú úlohu aj hustota atmosféry. Popri trení a čiastočnom natavení a odparení (vaporizácií) sa efekt pomerne hustej zemskej atmosféry prejavuje významným brzdením pádu meteoritu. Meteorit, resp. jeho úlomky síce často vybuchnú a rozpadnú sa, ale menšia časť ich materiálu sa môže zachovať.

Ešte väčšie meteoroidy (rádovo od metrov) už atmosféra dostatočne nezbrdí a dopadajú na povrch takmer pôvodnou kozmickou rýchlosťou, vybuchujú a vytvárajú impaktné krátery. Napr. telesá o hmotnosri rádovo 100 ton dopadnú rýchlosťou cca 20 km/s a pri hmotnosti okolo 1000 ton už týchlosťou približne 28 km/s.

Meteority dopadajúce na Mesiac, ktorý je prakticky bez atmosféry, nie sú brzdené a dopadajú pôvodnou rýchlosťou. V dôsledku toho sa pri páde meteority úplne rozpadnú, resp. vybuchnú alebo vaporizujú a zanechajú po sebe len impaktný kráter. Na druhej strane veľmi hustá atmosféra na Venuši spôsobuje, že v dôsledku silného trenia sa telesá menšie ako cca 300 m deštruujú a zhoria v atmosfére ešte pred dopadom, pričom šancu dopadnúť majú len väčšie telesá. Preto sa na Venuši vyskytujú len impaktné krátery s priemerom väčším ako približne 3 km.

Ďalšími dôležitými faktormi zachovania sa, resp. fragmetácie meteoritov pri prelete zemskou atmosférou je ich minerálne zloženie, hustota, rýchlosť pádu a uhol dopadu. Všeobecne platí, že väčšiu šancu na kompletný dopad meteoritu na zemský povrch majú železno-niklové kovové meteority s vyššou hustotou a súdržnosťou, ako silikátové a najmä porézne meteority s nižšou hustotou. Najväčšia časť pôvodnej hmoty meteoritu (až do 90 % v prípade kovových meteoritov) môže byť zachovaná, ak je jeho rýchlosť pri dopade zabrzdená atmosférou pod hodnotu cca 12 km/s a súčasne teleso má vysoký uhol dopadu (zhruba nad 60°). Pri nízkych uhloch dopadu a tým dlhšej dráhe letu atmosfétou dochádza najmä v prípade silikátových meteroritov k ich prudkému zahriatiu a rozpadu (fragmentácií) až k výbuchu a totálnej deštrukcií pôvodného telesa na veľký počet malých až mikroskopických úlomkov.

Horná hranica veľkosti meteoritov na Zemi nie je jasne definovaná. Treba si totiž uvedomiť, že sa prakticky vždy jedná len o úlomky pôvodne väčších telies, ktoré sa rozpadli, resp. vybuchli v atmosfére ešte pred dopadom na povrch Zeme. Priemerná veľkosť meteoritov je preto menej ako 10 cm, telesá väčšie ako 50 cm sú už pomerne vzácne. Dosiaľ najväčšie nájdené mimozemské teleso je železný meteorit Hoba (Namíbia) má rozmery približne 2,7 x 2,7 x 1 m a hmotnosť okolo 60 ton ***(obr. 24)***.

Obr. 24. *Železný meteorit Hoba pri meste Grootfontein v Namíbií. Je to najväčší meteorit dosiaľ nájdený na Zemi s rozmery cca 2,7 x 2,7 x 1 m a hmotnosťou okolo 60 ton (Zdroj: www.sky-today.com).*

4.2. Klasifikácia, zloženie a genéza meteoritov

Meteority sú ľudstvu známe už z prehistorických dôb. Pôvod (genézu) týchto zvláštnych kameňov a železitých hmôt si však ľudia dlho nevedeli vysvetliť. Vedci sprvu razantne odmietali pripustiť kozmický pôvod meteoritov, nepripustili, že „kamene môžu padať z neba“. Až opakované pozorované pády a bezprostredné nálezy meteoritov, najmä hromadný meteoritový pád („meteoritový dážď“) pri francúzskom L`Aigle prinútili členov slávnej parížskej Akadémie v r. 1805 uznať mimozemský pôvod meteoritov. Dlhú dobu však boli nálezy meteoritov pomerne vzácne; napr. do roku 1900 bolo známych len necelých 900 exemplárov meteoritov. Ich počet začal prudko narastať až po zorganizovaní mnohých špeciálne zameraných vedeckých výprav (najmä USA a Japonsko) za meteoritmi do

zaľadnených oblastí Zeme, hlavne do Antarktídy a Grónska, ako aj púštnych oblastí Sahary, Austrálie a inde. V zaľadnených a púštnych oblastiach bez vegetácie sa totiž meteority dajú najľahšie identifikovať podľa nápadnej farby a tvaru. V zaľadnených regiónoch sa navyše meteority hromadia v zónach pozdĺž horských chrbtov, kde dochádza k prednostnému topeniu ľadovca. Tieto expedície priniesli desaťtisíce nových nálezov meteoritov, takže spolu so staršími aj novšími nálezmi z ostatných oblastí v súčasnosti evidujeme okolo 50 000 medzinárodne uznaných exemplárov meteoritov, ktoré sú oficiálne evidované v neustále doplňovanej svetovej databáze meteoritov. Jasne sa ukázalo, že meteority tvoria veľmi rôznorodú skupinu hornín, od silikátových kamenných meteoritov, cez prechodné kamenno-železné až po prakticky čisté železné, resp. železno-niklové kovové meteority.

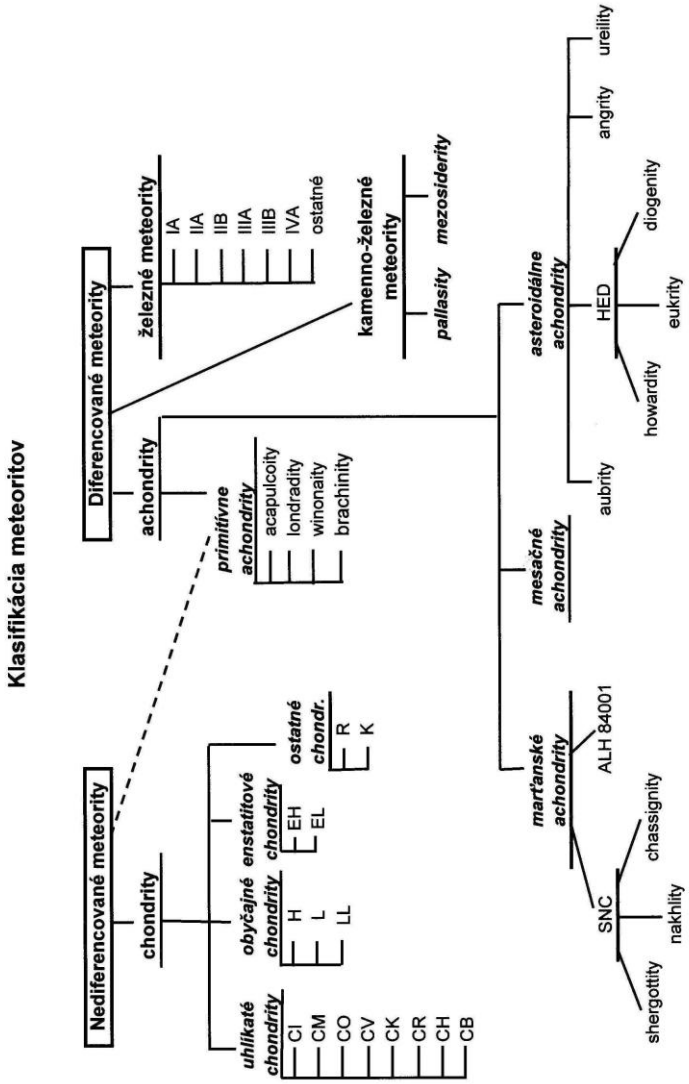
Súčasná klasifikácia meteoritov je založená predovšetkým na ich petrologických charakteristikách, minerálnom a chemického zložení, ako aj predpokladanej genéze a veku ***(obr. 25)***. Podľa týchto princípov možno meteority rozdeliť na dve základné kategórie:

1. Nediferencované meteority (chondrity)
2. Diferencované meteority (achondrity, kamenno-železné a železné meteority).

Pritom každá z týchto základných genetických kategórií je ďalej členená na základe vyššie uvedených kritérií.

1. Nediferencované meteority (chondrity) predstavujú ďaleko najrožšírenejšiu skupinu meteoritov (približne 95 % známych exemplárov). Predstavujú geochemicky primitívnu hmotu, ktorá vznikla akréciou (nabaľovaním) prvotného materiálu našej slnečnej sústavy, ešte tesne pred vznikom dnešných planét. Predstavujú materiál akoby „nedokončených“ planét, teda menších telies, označovaných ako planetesimály, resp. asteroidy. Chondrity sú tvorené najmä silikátovými minerálmi (najmä pyroxény a olivíny, menej živce) a malým množstvom Fe-Ni zliatin, karbidov, fosfidov, sulfidov, oxidov a fosfátov v základnej hmote (matrix) a drobnými (obvykle 0,1 až 3 mm veľkými) guľovitými útvarmi, tzv. chondrulami (z čoho je odvodený aj názov týchto meteoritov). **Chondruly** sú takisto zložené najmä zo silikátov. Materské telesá chondritov (asteroidy, planétky) mali príliš malé rozmery na to, aby v nich v priebehu vývoja došlo k pretaveniu a výraznejšej chemickej diferenciácií v rámci telesa a následne k vytvoreniu zonálnej stavby (jadro – plášť – kôra; podobne ako na Zemi a ostatných terestrických planétach). Na základe primitívneho chemického zloženia nediferencovaných meteoritov sa predpokladá, že vznikli z materiálu tvoriaceho sa Slnka (protosolárna hmlovina), menších asteroidov a komét. Po prvotnej magmatickej kryštalizácií chondrúl a ich akrécií s materiálom základnej hmoty došlo v chondritoch len k metamorfnej

rekryštalizácií v pevnom stave, pri teplotnom intervale približne 400 až 950 °C, alebo k nižšie teplotnej alterácií za prítomnosti vodou obohatených fluíd (pod 400 °C). Na základe teploty tejto metamorfnej rekryštalizácie hmoty možno rozlíšiť **6 petrologických typov chondritov**. Najlepšie zachovanú pôvodnú horninovú textúru a štruktúru chondritov má petrologický typ 3. Typy 1 a 2 predstavujú nižšie teplotné alterované hmoty, typ 4 už vykazuje výraznejšie znaky prvotnej metamorfnej rekryštalizácie a homogenizácie pôvodnej hmoty meteoritu.



Obr. 25. *Klasifikácia meteoritov (A. Bischoff 2005; zdroj: www.uni-muenster.de).*

Najvyššiu petrologickú homogenitu (teda najmenšie odchýlky v chemickom zložení jednotlivých minerálov a súčasne nezreteľné pôvodné chondrule) majú chondrity petrologického typu 6. Navyše v dôsledku impaktov chondritických asteroidov s podobnými telesami sú chondrity často druhotne a šokovo metamorfované až lokálne pretavené pri vysokých tlakoch (5 až 90 GPa). Dochádza pritom k vzniku undulózneho zhášania, planárnych trhlín, mozaikovitej stavby až rekryštalizácií olivínu a tvorbe skla po plagioklase (tzv. maskelynitu). na základe intenzity možno rozlíšiť **6 štádií šokovej metamorfózy chondritov**, od šokovo nepostihnutých (štádium S1, tlak pod 5 GPa) až po veľmi silne šokovo postihnuté (štádium S6, 75 až 90 GPa).

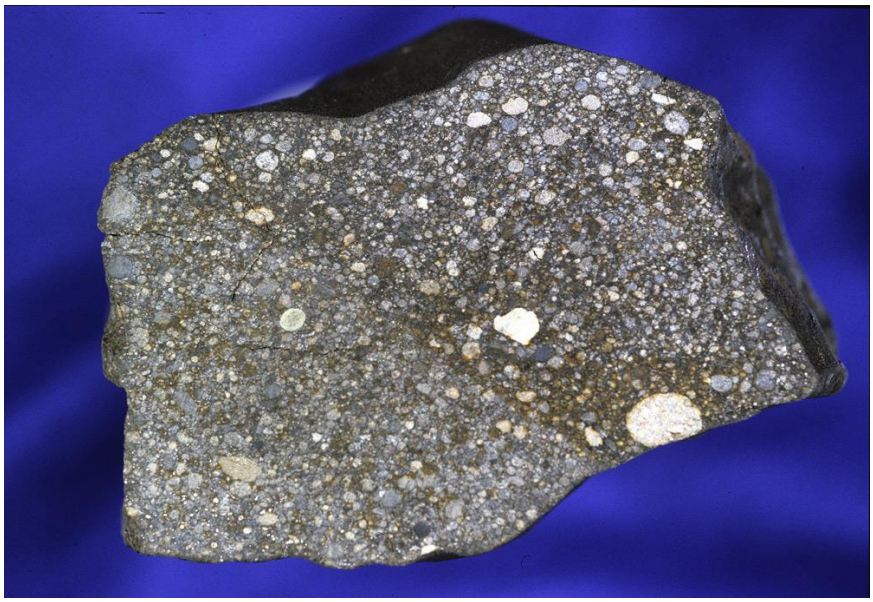
Za úplne geochemicky najprimitívnejšiu triedu v rámci chondritov aj meteoritov celkovo sú považované **uhlíkaté chondrity (***carbonaceous chondrites* **- C)**. Predstavujú geochemicky najmenej prepracované horniny v Slnečnej sústave. Chondruly sú v nich vzácne, alebo úplne chýbajú, avšak lokálne sa v nich vyskytujú drobné, milimetrové až centimetrové uzavreniny (inklúzie) materiálu, obohateného Ca a Al (tzv. **CAI**). Na základe ich chemického a izotopického zloženia sa predpokladá, že CAI predstavujú kondenzovanú hmotu, ktorá vznikla priamo z horúcej hmloviny pri vzniku Slnečnej sústavy a časť z nich má dokonca pôvod z hviezd mimo slnečnej sústavy. Práve tieto špecifické a pomerne vzácne meteority majú popri silikátoch a Fe-Ni zliatin aj zvýšené obsahy uhlíka vo forme karbonátov aj organických zlúčenín (dokonca zložitých amínokyselín) a vody, viazanej v hydroxylovej skupine silikátov. Logicky sa preto uvažuje, že život na Zem mohol prísť z vesmíru prostredníctvom uhlíkatých chondritov. Uhlíkaté chondrity sa delia na základe veľkosti a zastúpenia chondrúl a CAI, minerálneho obsahu (silikáty, Fe-Ni) na niekoľko skupín, pomenovaných podľa typického meteoritu, napr. typ Ivuna (CI) , Mighei (CM), Ornans (CO), Vigarano (CV), Karoonda (CK) atď. Zvlášť známym a študovaným uhlíkatým chondritom je **Allende** (klasifikovaný ako CV3, teda uhlíkatý chondrit typu Vigarano, petrologický typ 3), ktorý dopadol 8.2.1969 v podobe meteoritického dažďa, teda tisícov úlomkov pôvodného telesa, ktoré vybuchlo a rozpadlo sa v atmosfére pri obci Pueblito de Allende v štáte Chihuahua pri západnom pobreží Mexika ***(obr. 26)***. Hmotnosť pôvodného úlomku asteroidu sa odhaduje na viac ako 5 ton, jeho fragmenty boli rozptýlené v pádovom poli o rozmeroch 50 x 8 km. Uhlíkatý chondrit Allende obsahuje veľké množstvo CAI, inklúzií hmoty pravdepodobne extrasolárneho pôvodu, teda z materiálu iných hviezd. Poukázali na to nezvyčajné pomery izotopov viacerých prvkov (N, Al, Kr, Xe) v CAI meteoritu Allende. Tento extrasolárny materiál zrejme vznikol pri výbuchu supernovy, veľmi masívnej hviezdy, asi 2 Ma pred sformovaním našej Slnečnej sústavy. Vek tejto hmoty bol zmeraný na 4,57 Ga,

Obr. 26. *Uhlíkatý chondrit typu CV3 Allende. Hmotnosť úlomku 5,5 g (Zdroj: www.meteoris.de).*

teda je približne o 30 Ma starší, ako vek sformovania Zeme ako planéty a cca 290 Ma starší, ako najstarší datovaný pozemský materiál (minerál zirkón). Je skutočne veľkou zhodou okolností, že ešte v tom istom roku, 28.9.1969, dopadlo vyše 100 kg úlomkov meteoritu **Murchison** v štáte Victoria v JV Austrálií. Tento uhlíkatý chondrit bol klasifikovaný ako CM2 S1-2 (typ Murchison, petrologický typ 2, šokové štádium 1 až 2). Petrologický typ 2 indikuje jeho silnú alteráciu fluidami obohatenými vodou; Murchison obsahuje až 12 % H_2O. Okrem toho Murchison obsahuje aj bežné CAI. Najzaujímavejším zistením v tomto uhlíkatom chondrite je však prítomnosť najmenej 70 druhov amínokyselín (napr. glycínu, alanínu, kyseliny glutámovej, izovalínu, pseudoleucínu), zložitých organických zlúčenín, ktoré sú základnou komponentou živých organizmov.

Obyčajné chondrity (*ordinary chondrites* – **OC**) sú najbežnejšou triedou v rámci chondritov aj meteoritov celkovo (cca 85 % všetkých známych meteoritov). Sú to typické silikátové meteority, tvorené základnou hmotou (matrix) a chondrulami. Z minerálov v matrixe sú dominantné forsterit (olivín) a enstatit (pyroxén), vyskytujú sa tu aj ostatné pyroxény (pigeonit, augit, diopsid), plagioklasy, v malom množstve sa vyskytujú (Fe-Ti zliatiny (kamacit, taenit, tetrataenit), troilit (FeS), chromit, merrillit (fosfát Ca), karbidy atď. Chondrule sú zložené najmä z olivínu a pyroxénu. Na základe obsahu Fe vo forme Fe-Ni zliatin (kamacitu a taenitu) a troilitu naopak obsahu Fe v oxidačnej forme (v silikátoch forsterite a enstatite) možno obyčajné chondrity rozdeliť do troch skupín ***(obr. 25)***: 1.

chondrity H (*High iron*) s najvyšším celkovým obsahom železa a obsahom Fe v podobe zliatin a troilitu, ale súčasne s najnižšími obsahmi FeO, resp. Fe vo forsterite a enstatite (16-20 mol. % Fe_2SiO_4, resp. fayalitu v olivíne a 14-20 mol. % $Fe_2Si_2O_6$), 2. **chondrity L** (*Low iron*) s nižšími obsahmi Fe v chondrite, zliatinami Fe-Ni a v troilite, ale súčasne s vyššími obsahmi FeO v chondrite a v silikátoch (21-25 mol. % fayalitu, 20-30 mol. % ferosilitu) – ***(obr. 27)*** a 3. **chondrity LL** (*Low Low iron*) obsahujúce najmenej celkového železa, ako aj Fe v zliatinách Fe-Ni a v troilite, ale obsahujúce najviac Fe v silikátoch forsterite a enstatite (26-32 mol. % fayalitu, 32-40 mol. % ferosilitu).



Obr. 27. *Chondrit L3 Mezõ-Madaras, Harghita (Rumunsko). Veľkosť úlomku: 7 cm (Zdroj: www.meteorites.asu.edu).*

Osobitnú triedu tvoria pomerne zriedkavé **enstatitové chondrity** (*enstatite chondrites* – **E**); dominantný minerál v nich je silikát enstatit (pyroxén). Tieto chondrity majú len veľmi nízke obsahy Fe vo forsterite a enstatite, ale súčasne vyššie obsahy Fe ako v obyčajných chondritoch (22-33 hmot. %). Prakticky všetko železo je tu koncentrované v Fe-Ni zliatinách a v troilite, čo indikuje extrémne redukčné podmienky vzniku enstatitových chondritov. Na redukčné podmienky a ochudobnenie kyslíkom poukazuje aj prítomnosť ďalších bezkyslíkatých minerálov, ako sú oldhamit CaS, niningerit MgS, alabandín MnS, osbornit TiN, sinoit Si_2N_2O a iné. Na základe obsahov železa sa enstatitové chondrity tiež delia na skupinu **EH** (*Enstatite High iron*) a **EL** (*Enstatite Low iron*).

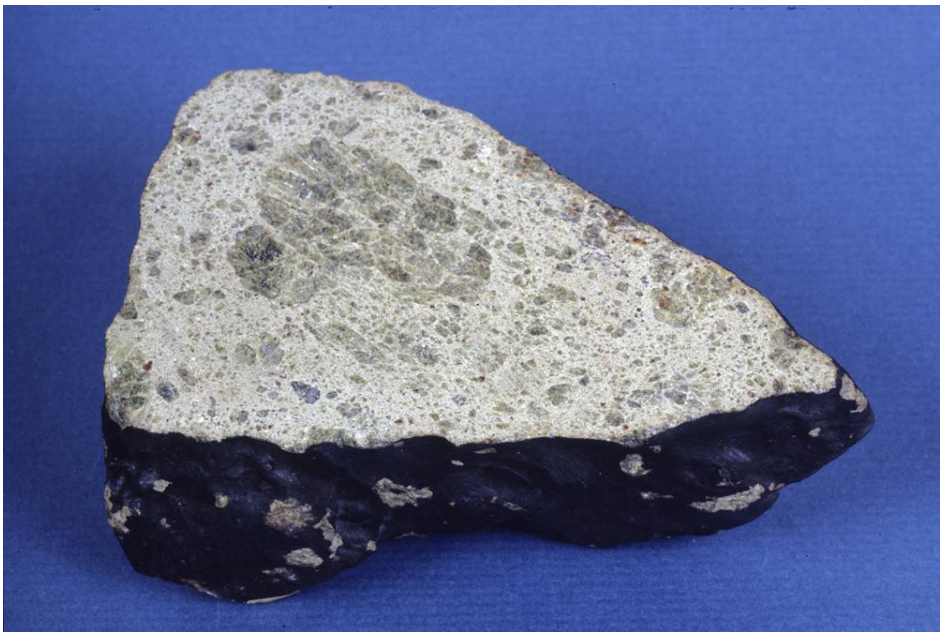
Vzácne **chondrity Rumuruti (R)** tvoria skupinu metamorfovaných, zbrekciovatelých a vysoko oxidovaných meteoritov. Sú takmer bez Fe-Ni zliatiny (kamacit a taenit), zato

s olivínom obohateným Fe a Ni. Taktiež skupina **chondritov Kakangari (K)** patrí k výnimočným chondritom s vysokým podielom základnej hmoty, tvorenej takmer čistým enstatitom a Fe-Ni zliatinou.

2. Diferencované meteority (achondrity, kamenno-železné a železné meteority) tvoria početne oveľa menej rozšírenú (asi 5 %), ale chemicky, mineralogicky a petrologicky veľmi rôznorodú populáciu meteoritov. Na základe ich zloženia predpokladáme, že sa jedná o magmatické horniny, alebo brekcie magmatických hornín. Diferencované meteority vznikli vo väčších asteroidoch (planétkach), mesiacoch planét až planétach, kde počas prvotného roztavenia a kryštalizácie pôvodne chondritického materiálu došlo k oddeleniu (diferenciácií) špecifických horninových typov na časti bohaté na kovové Fe a Ni v jadre týchto telies a silikátmi obohatenej časti, zodpovedajúcej plášťu, prípadne aj kôre materských telies, podobne ako na Zemi. A naopak, aj na základe analógií s diferencovanými meteoritmi usudzujeme, že aj zemské jadro je zložené zo zliatiny Fe-Ni a že horniny zemského plášťa majú silikátové zloženie, bohaté Mg (v prípade zemského plášťa sú naviac priamo k dispozícií aj horniny plášťového pôvodu, transportované najmä bázickými lávami). Tieto meteority sa všeobecne označujú ako achondrity, pretože neobsahujú chondruly.

Prechodnou skupinou medzi diferencovanými a nediferencovanými meteoritmi sú **primitívne achondrity** (*Primitive Achondrites* – **PAC**). Oproti chondritom sú to síce štruktúrne diferencované, ale geochemicky pomerne primitívne silikátové meteority. Patria sem olivinicko-pyroxenické **acapulcoity (ACAP)**, **londradity (LON)** a **winonaity (WIN)**, zložením podobné chondritom, ako aj **brachinity (BRA)**, zložené takmer výlučne z olivínu. Primitívne achondrity vznikli nedokonalým pretavením a diferenciáciou, resp. silnou metamorfózou chondritov.

Asteroidálne achondrity sú pravdepodobne úlomky väčších diferencovaných asteroidov (planétok), ako Vesta (klan **HED: howardity, eukrity a diogenity**), prípadne iných asteroidov (angrity, aubrity, ureility). Kým **eukrity (EUC)** majú zloženie bazaltu a **diogenity (DIO)** sú ortopyroxenity ***(obr. 28)***, **howardity (HOW)** predstavujú brekciovitú zmes oboch horninových zložiek, teda bazaltov a ortopyroxenitov. **Angrity (ANG)** sú achondrity bazaltového horninového typu so špecifickým minerálnym zložením, s pyroxénom, olivínom a plagioklasom (anortitom) s vysokým obsahom Ca. Oproti tomu **aubrity (AUB)** sú obvykle brekcie s dominantným enstatitom, teda takmer výlučne horečnatým pyroxénom, čo naznačuje vysoko redukčné prostredie ich vzniku (podobne ako enstatitvé chondrity). Brekciovitý charakter majú obyčajne aj **ureility (URE)**, zložené najmä

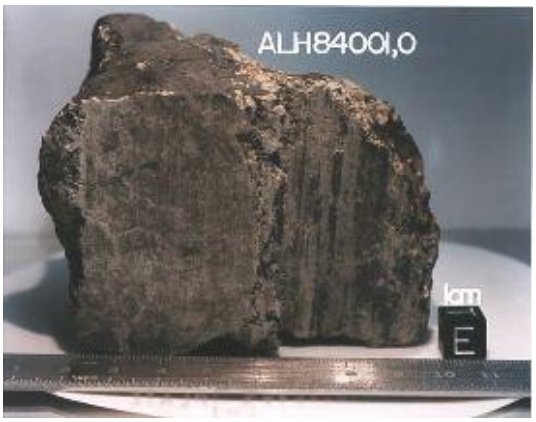


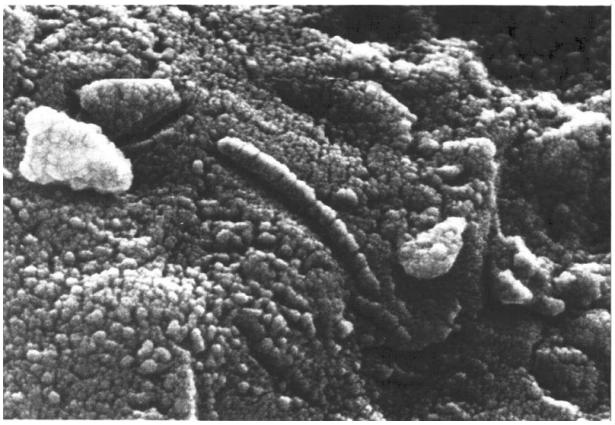
Obr. 28. *Achondrit – diogenit Johnstown (Colorado, USA). Veľkosť úlomku: 13 cm. (Zdroj: www.meteorites.asu.edu).*

z olivínu a pyroxénu. Charakteristický pre ureility je zvýšený obsah uhlíku v podobe grafitu a často tiež diamantu, prítomný je aj troilit a Fe-Ni zliatiny. Na základe prítomnosti drobných kryštálov diamantu sa usudzuje, že ureilitové brekcie mohli vzniknúť v dôsledku mohutného impaktu iného vesmírneho telesa na materský asteroid, ktorý zatlačil povrchovú vrstvu asteroidu (regolit) až do jeho olivínom bohatého plášťa a vytvoril diamant ako indikátor ultravysokotlakovej šokovej metamorfózy.

Mesačné achondrity, lunaity (*Lunar achondrites, Lunaites* - **LUN**) tvoria veľmi vzácnu skupinu meteoritov (vyše 50 doteraz známych exemplárov, resp. vyše 100 úlomkov). Ich úlomky boli opísané až r. 1982 v Antarktíde. Na základe analógie s mesačnými horninami, privezenými americkými astronautmi misie Apollo a ruskej sondy Luna boli identifikované achondrity, zhodné s mesačnými bazaltami, anortozitmi aj regolitovými impaktovými brekciami z povrchu Mesiaca.

Marťanské meteority (*Shergottites, Naklites, Chassignites* - **SNC**) boli tiež objavené medzi početnými nálezmi antarktických meteoritov r. 1982. Sú to takisto unikátne meteority, doteraz bolo zaregistrovaných okolo 40 exemplárov (resp. vyše 60 úlomkov). **Shergottity (SHE)** zodpovedajú bazaltom a peridotitom s horninotvorným olivínom, pyroxénmi a plagioklasom. **Nakhlity (NAK)** sú jemnozrnné pyroxenity s prímesou olivínu, **chassignity (CHA)** sú analogické dunitom s prevládajúcim olivínom. Špeciálnu kategóriu predstavuje jediný kus marťanského achondritu, s katalógovým označením **ALH 84001**, nájdený r. 1984

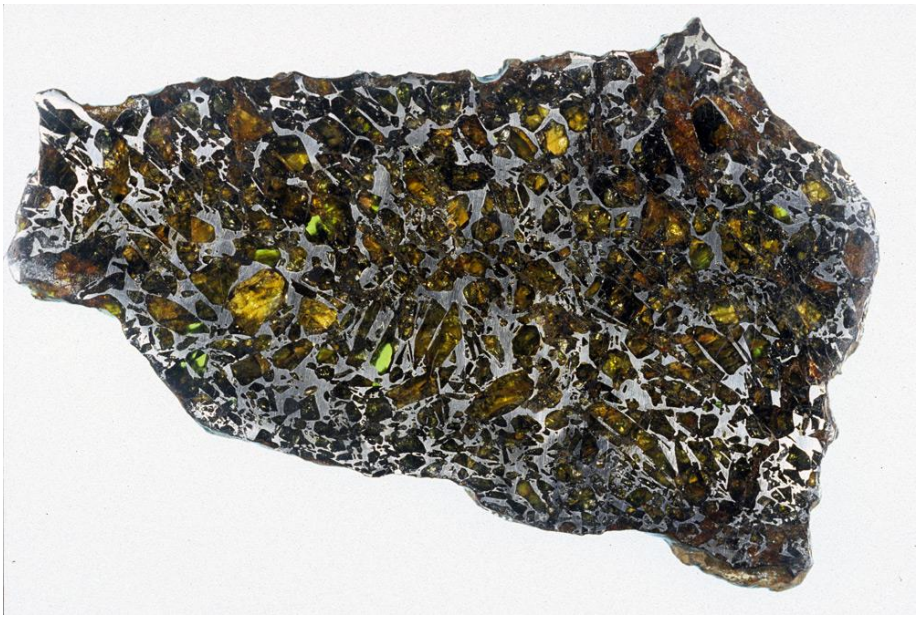




Obr. 29. Vľavo: *Úlomok marťanského meteoritu ALH 840001, nájdeného v Antarktíde, veľkosť 9 cm.* ***Vpravo:*** *Záhadná štruktúra v meteorite ALH 840001 (v strede), pripomínajúca nanobaktérie. Priemer štruktúry do 100 nm (Zdroj: www.nasa.gov; www.serc.carleton.edu).*

na lokalite Allan Hills v Antarktíde ***(obr. 29)***. V tomto 1,94 kg ťažkom achondrite ortopyroxenitového zloženia boli totiž nájdené mikroskopické globulárne útvary, zložené z karbonátu s lemom obohateným Mg a Fe, a v týchto karbonátových globulách bola objavená štruktúra, tvarom pripomínajúca najstaršie pozemské fosílie - primitívne baktérie, staré 3,5 Ga. Časť vedcov sa preto domieva, že sa jedná o skutočný doklad dávneho primitívneho života na Marse; vek tohto achondritu bol určený na 4,4 Ga, pričom pred 3,8-4,0 Ga bol šokovo metamorfovaný. Jednoznačný dôkaz o biotickom pôvode týchto útvarov však dosiaľ chýba. Osobitné vlastnosti má aj zatiaľ ojedinelý marťanský achondrit **NWA 7034**, objavený r. 2011. Má bazaltové zloženie, avšak jeho zvláštnosťou je, že obsahuje až 10-násobne viac vody, ako ostatné dosiaľ známe meteority z Marsu. Predpokladá sa, že pochádza z najvrchnejšej časti planéty, z kôry Marsu, navyše izotopy kyslíka naznačujú, že bol v kontakte s marťanskou atmosférou. Zaujímavý je jeho pomerne mladý vek, stanovený na 2,1 Ga.

Pomerne zriedkavé **kamenno-železné meteority** tvoria prechod medzi silikátovými achondritmi a železnými meteoritmi. **Mezosiderity (MEZ)** obsahujú približne rovnaké množstvo silikátovej hmoty a Fe-Ni zliatiny s troilitom (FeS). Silikátová hmota je tvorená úlomkami pyroxénov, olivínu a plagioklasu, ako aj achondritických hornín (gabrá, pyroxenity, alebo bazalty); čo indikuje príbuznosť k asteroidálnym achondritom klanu HED. Ku kamenno-železným meteoritom sú zaraďované aj **pallasity (PAL)**, tvorené silikátovou zložkou – najmä olivínom (forsteritom), lokálne pyroxénom a Fe-Ni kovom (zmesou minerálov kamacitu a taenitu) – ***obr. 30.*** Pallasity sú názorným príkladom materiálu



Obr. 30. *Kamenno-železný meteorit – pallasit Albin (Wyoming, USA). Veľkosť úlomku: 18 cm (Zdroj: www.meteorites.asu.edu).*

diferencovaných telies na rozhraní kovového jadra a spodného silikátového plášťa. Podľa minerálneho zloženia možno pallasity rozdeliť do troch skupín: najpočetnejšie **pallasity hlavnej skupiny (MG PAL)**, **pallasity typu Eagle Station (ES PAL)** a **pyroxenické pallasity (PP PAL)** s olivinicko-pyroxenickou silikátovou zložkou.

Železné meteority ***(obr. 31)*** sú tvorené dominantnými zliatinami Fe a Ni, teda minerálmi kamacitom (železo s obsahom do 7,5 % Ni) a taenitom (železo s 20 – 45 % Ni), v

Obr. 31. *Železný meteorit skupiny IIAB Sichote-Alin (Rusko). Veľkosť: 5 x 3 cm. Materiál autora. Foto: Jarmila Uhrová Kernová.*

malom množstve sa vyskytujú aj ďalšie minerály bez prítomnosti kyslíka, najmä cohenit $(Fe,Ni,Co)_3C$, schreibersit $(Fe,Ni)_3P$ a troilit, lokálne aj inklúzie silikátových minerálov. Ich vnútorná stavba, tvorená odmiešanými lamelami taenitu v kamacite, najlepšie vynikne na narezanej rovnej ploche meteoritu, naleptanej kyselinou dusičnou. Vtedy vyniknú tzv. **Widmanstättenove obrazce**, charakteristický poznávací znak ich meteoritického pôvodu ***(obr. 32)***. Pre svoj nápadný kovový vzhľad a lepšiu odolnosť oproti silikátovým (kamenným) chondritom a achondritom reprezentujú železné meteority až 40 % všetkých nálezov dávnejšie dopadnutých meteoritov, avšak tvoria len asi 4 % všetkých zaznamenaných pádov

Obr. 32. *Widmanstättenove obrazce (odmiešané lamely taenitu v kamacite) na narezanej ploche železného meteoritu skupiny IVA Gibeon (Namíbia). Veľkosť: 63 x 27 mm. Materiál autora. Foto: Jarmila Uhrová Kernová.*

meteoritov. Železné meteority predstavujú úlomky jadier väčších diferencovaných asteroidov (planétok), alebo aj planét. Aj na základe analógie so železnými meteoritmi sa predpokladá, že podobné chemické a minerálne zloženie má aj kovové jadro našej Zeme. Súčasná klasifikácia železných meteoritov je založená na ich chemickom zložení, najmä na obsahu Ni, Ir, Ga a Ge, pričom možno rozlíšiť skupiny **IA**, **IIA**, **IIB**, **IIIA**, **IIIB**, **IVA** a **ostatné železné meteority**. Časté sú aj prechodné typy, označované napr. **IAB, IIIAB** a podobne. Dodnes je však používaná aj staršia klasifikácia, ktorá je založená na vnútornej štruktúre železných meteoritov – stavbe, pričom rozlišujeme oktaedrity, hexaedrity a ataxity. V najrozšírenejších oktaedritoch potom možno rozlíšiť podľa hrúbky kamacitových lamiel najhrubšie (Ogg), hrubé (Og), stredné (Om), jemné (Of), najjemenjšie (Off) a tzv. plessitické oktaedrity (Opl).

4.3. Meteority z územia Slovenska

Na území Slovenska bolo doteraz zaznamenaných viacero historických aj súčasných pozorovaných pádov a nálezov meteoritov. Najstarší známy opis pádu meteoritu zaznamenal 27. novembra 1607 Michal Závodský, kastelán na hrade **Lietava**, ktorý o tom podáva správu svojmu pánovi, palatínovi Jurajovi Thurzovi (vo vtedajšej archaickej slovenčine):
„Vašej milosti oznamuji, že sem dnes prave o hodine sedmej večernej na to patril i hlasni a vartovnici i jinych nekolik osob na to patrilo, velmi hrozný a strašlivý z nebe oheň, dluhý jako brvno skrovné, dolu letel, až temer zamek včecek osvietel a potom po malej chvíli, jakoby se tri krát prez pokoj prešiel, takový hrmot, strilení jako z kušu a zemetrasení slyšeno bylo, že se okna skla i dvere zamkove zatrasli a ten zvuk a hrmot stál jakoby z hakovnice aneb velikého kušu strelil. Teho pak ohnie čo z nebe letel i vartovnici i ja jsouce prestrašeni jaki sem se dovedoval, kde by preve padl, povedali vartovnici, že za Veliký Cibulnik upadl. Až v tom, když ten hrmot stal, i hradsky starý Mikuláš Vavrinec vybehol na vartu z svej komory kde spal a dovedoval se vartovnikov, kde strileji ..". Podľa tohoto opisu je zrejmé, že sa jednalo o pád zrejme väčšieho kusu (alebo viacerých kusov) meteoritu. Konkrétny meteorit však nebol dosiaľ nájdený, takže sa ani nevie, o aký typ (chondrit, achondrit, železný, atď.) sa jednalo.

Priame nálezy a čerstvo spadnuté meteority sú k dispozícií až od 19. storočia. V októbri roku 1814 našiel pastier pri obci **Lenartov** neďaleko Bardejova železný meteorit (oktahedrit, typ IIIAB) o hmotnosti 108 kg. Je to jeden z prvých meteoritov, na ktorom robil rakúsky prírodovedec Alois Beck von Widmanstätten pokusy s leptaním, pričom sa ukázala známa štruktúra, pomenovaná po ňom.

Dňa 24. júla 1837 o 11:30 h bol spozorovaný pád meteoritu neďaleko obce **Divina** pri Žiline. Čerstvo dopadnutý meteorit sa následne aj našiel, mal hmotnosť 10,75 kg, mal tmavú natavenú kôru a ešte pol hodiny po dopade bol zohriaty. Na základe analýz sa jedná o obyčajný chondrit H.

Zatiaľ najväčšie známe meteority z územia Slovenska boli nájdené v okolí zaniknutej obce Slanica pri Námestove (zatopenej Oravskou priehradou) na svahoch pohoria Oravská **Magura**. Miestni lesní robotníci tu v rokoch 1830 - 1840 nachádzali až 40 kg ťažké kusy železa, ktoré pokladali za kvalitnú železnú rudu a odnášali ich do hutí, kde sa z nich vyrábali motyky a sekery. Dokonca sa uvažovalo aj o miestnej ťažbe železa. Až v r. 1844 významný viedenský mineralóg Wilhelm von Haidinger zistil, že sa jedná o železné meteority (oktaedrity typu IAB). Predpokladá sa, že šlo o hromadný pád väčšieho počtu meteoritov, pretože na lokalite neboli zistené žiadne stopy po kráteri, ktorý by svedčil skôr o dopade

jediného veľkého celotvaru. Odhaduje sa, že celková pôvodná hmostnosť meteoritických želiez z Magury bola približne 1,5 až 2 tony. Do súčasnosti sa zachovalo cca 150 kg materiálu ***(obr. 33)***. Železný meteorit z Oravskej Magury patril k intenzívne skúmaným objektom výskumu už od polovice 19. storočia. V meteorite prevláda kamacit a taenit (zliatiny Fe-Ni), zistený bol aj troilit, pyroxény, chromit a ďalšie minerály. Navyše boli z neho opísané dva nové minerály, dnes už klasické fázy, známe z mnohých meteoritov: schreibersit $(Fe,Ni)_3P$ a cohenit $(Fe,Ni,Co)_3C$, ako aj tzv. cliftonit, zrejme pseudomorfózy grafitu po diamante.

Obr. 33. *Železný meteorit skupiny IAB Magura (Slovensko). Hmotnosť úlomku: 748 g (Zdroj: www.mhmeteorites.com).*

9. júna 1866 pozorovali ľudia na oblohe nad Liptovským Mikulášom ohnivú guľu, letiacu smerom na východ. Jednalo sa o veľký bolid, ktorý explodoval s detonáciou podobnou hromu ešte v atmosfére, rozpadol sa a dopadol približne o 17:00 h v podobe meteoritického dažďa, približne 220 km na východ v katastri obce **Knyahinya** (Kňahyňa), tesne na ukrajinskej strane hranice so Slovenskom. Je veľmi pravdepodobné, že časť materiálu dopadla aj na slovenské územie, v oblasti obce Zboj, pretože veľkosť pádového poľa sa odhaduje na cca 7 x 4 km. Bolo nájdených asi 1200 fragmentov meteoritov o celkovej hmotnosti okolo 500 kg, najväčší úlomok má hmotnosť 286 kg. Kňahyňský meteorit patrí medzi obyčajné chondrity typu L5.

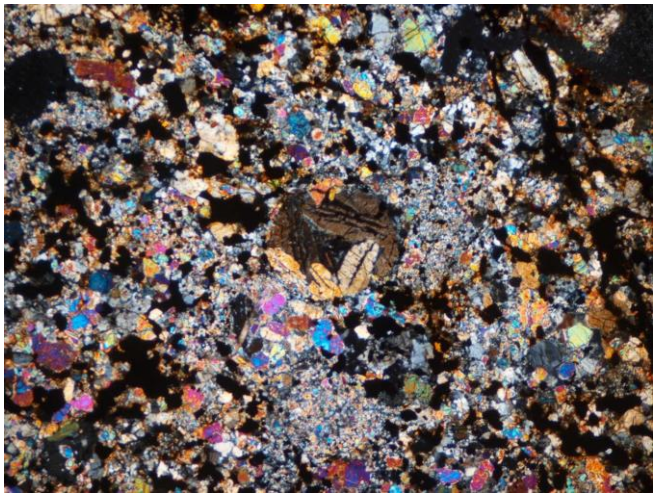
Ďalší dopad kamenného meteoritu bol zaznamenaný 9. mája 1895 pri obci **Veľké Borové** neďaleko Liptovského Mikuláša. Jedná sa o celotvar s jemnou natavenou kôrou, obyčajný chondrit typu L5 s hmotnosťou okolo 6 kg.

Po dlhšom čase sa ďalší meteorit našiel na poli pri žatve v auguste 1994 pri obci **Rumanová** neďaleko Nitry. Na základe zvetralinovej kôry, ako aj merania izotopu uhlíka ^{14}C

sa predpokladá sa, že tento meteorit dopadol na miesto nálezu už dávno, približne pred 12 tisíc rokmi. Meteorit má hmotnosť 4,3 kg a patrí medzi obyčajné chondrity typu H5.

Dňa 6. mája 2000 bol pozorovaný pád meteoritu **Morávka** na moravsko-slovenskej hranici. Meteorit letel v smere sever – juh smerom na Slovensko. Meteorit bol zachytený aj na videozáznamoch, bola vypočítaná dráha jeho letu a približné miesto dopadu. Teleso sa rozpadlo vo výške 30 až 35 km na viac častí a dopadlo do oblasti obce Morávka neďaleko Frýdku-Místku na severnej Morave. Odhadovaná pádová oblasť meteoritu má však rozmery cca 30 x 5 km a svojim južným cípom zasahuje aj na územie Slovenska severne od obce Klokočov na Kysuciach. Dokonca na základe výpočtov by sa najväčší úlomok meteoritu mohol nachádzať na slovenskej strane, približne 1 km južne od štátnej hranice s Českom. Celkovo bolo nájdených 6 úlomkov meteoritu s hmotnosťou 91 až 330 g (spolu sa našlo 1,1 kg materiálu), väčšina fragmentov, vrátane najväčších ale ešte stále leží v neprístupných lesoch na moravsko-slovenskej hranici. Meteorit Morávka možno zaradiť medzi bežné chondrity typu H5-6 a patrí medzi len cca 20 svetových meteoritov s tzv. rodokmeňom, kde je známe nielen jeho zloženie, dráha letu, ale na základe videozáznamov, seizmických údajov a zvukových vĺn boli vypočítané aj parametre jeho dráhy v medziplanetárnom priestore a dokázané, že pochádza z pásma asteroidov medzi Marsom a Jupiterom.

Doteraz posledný zaznamenaný a získaný materiál patrí meteoritu **Košice *(obr. 34)***.



Obr. 34. *Chondrit typu H5 Košice pod polarizačným mikrokopom, skrížené polaroidy. V strede je viditeľná guľovitá chondrula. Meteorit je zložený najmä z olivínu a pyroxénov. Materiál Katedry mineralógie a petrológie PriF UK v Bratislave. Foto: Daniel Ozdín.*

Jeho dráha a pád boli zaznamenané kamerami aj očitými svedkami. 28. februára 2010 o 23:24:46 h stredoeurópskeho času osvetlil nočnú oblohu nad strednou Európou veľmi jasný

meteor (bolid), ktorý napriek neskorej nočnej hodine videlo veľa ľudí v okruhu niekoľkých stoviek km. Vesmírne teleso letelo nad Slovenskom v smere od západu na východ, pričom došlo k štyrom explóziám a pôvodne takmer 1,5 metra veľké a niekoľko ton vážiace teleso explodovalo a rozpadlo sa vo výške 36 km nad povrchom Zeme. Meteorit počas pádu na Zem spôsobil v maxime jasnosti svetelný efekt, ktorý bol viac ako tisícnásobne jasnejší ako Mesiac v splne. Pravdepodobne len malá časť materiálu dopadla na povrch vo forme stoviek fragmentov v oblasti západne od Košíc. Najväčší nájdený úlomok košického meteoritu má veľkosť takmer 12 cm a hmotnosť 2,37 kg. Doteraz sa našlo vyše 200 fragmetov tohoto meteoritu. Na základe mineralogických a geochemických údajov možno meteorit Košice klasifikovať jako obyčajný chondrit H5. Podobne ako Morávka, aj Košice patria medzi cca 20 svetových meteoritov s rodokmeňom, pričom pochádza z pásma asteroidov medzi Marsom a Jupiterom.

Meteority, ktoré dopadli, resp.boli nájdené na území dnešného Slovenska v 19. storočí, teda pred vznikom Československa, sú dnes uložené v zbierkach rôznych svetových múzeí. Najlepšie exempláre vlastní Prírodovedecké múzeum vo Viedni (najmä Magura, Lenartov), Národné múzeum v Budapešti (Lenartov, Divina, Veľké Borové), Univerzita Tübingen v Nemecku (najväčší úlomok meteoritu Magura s hmotnosťou 45,5 kg), vzorky sú zastúpené aj v ďalších verejných a súkromných zbierkach. Materiál z nedávno dopadnutých meteoritov Rumanová a Košice je uložený aj v zbierkach Slovenského národného múzea v Bratislave (spolu s menšími úlomkami starších meteoritov zo slovenského územia).

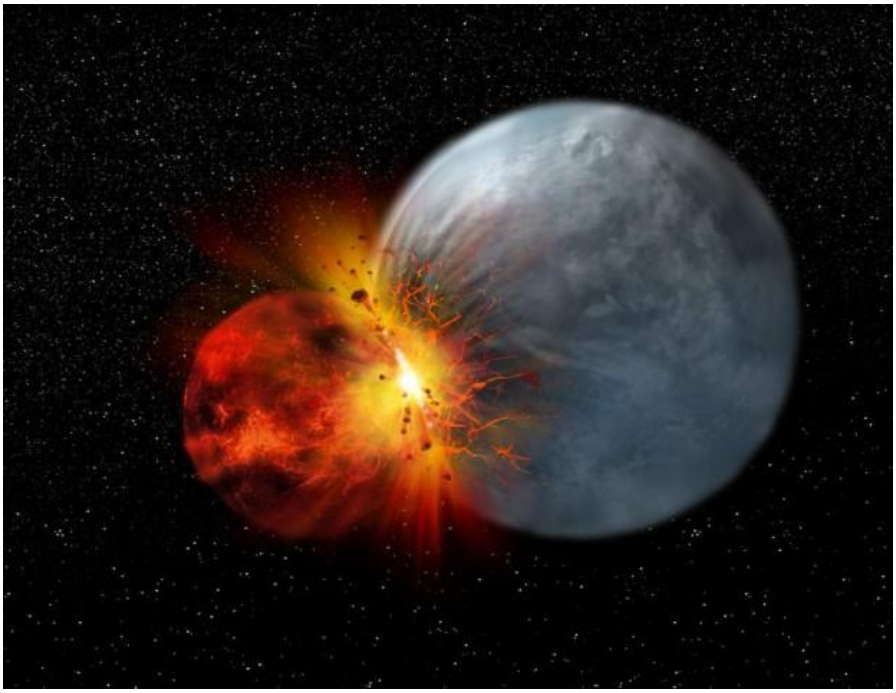
Okrem vyššie uvedených dokumentovaných pádov a nálezov meteoritov z územia Slovenska, kde je k dispozícií aj materiál (okrem historického pádu meteoritu pri hrade Lietava), sa uvádzajú nálezy meteoritov aj z ďalších lokalít, kde sa nepodarilo získať materiál (napr. Kláštor po Znievom, Svätý Jur, Nová Ves nad Žitavou). Navyše po roku 2000 boli pozorované pády niekoľkých, zrejme menších meteoritov, ktoré sa však doteraz nepodarilo nájsť (Zvolen, Šášovské Podhradie pri Žiari nad Hronom, Ostrov pri Piešťanoch).

5. Impaktné kráterovanie v histórií Zeme: vplyv na evolúciu litosféry a života

5.1. Hádeanské a archaické impakty

História našej planéty je od jej začiatku až po dnes ovplyvňovaná okrem endogénnych a exogénnych procesov aj kozmogénnymi udalosťami – extraterestriálnymi impaktami. Veľké impaktné udalosti mohli mať v dôsledku svojej obrovskej energie katastrofický regionálny až globálny vplyv na vtedajší život a v niektorých prípadoch mohli ovplyvniť aj vývoj (evolúciu) litosféry, napr. vyvolať tavenie kôry až plášťa (magmatizmus), prípadne ovplyvniť doskovú tektoniku.

Najväčšej vesmírnej kolízií bola vystavená mladá, sotva vytvorená planéta Zem, s vekom približne len 40 Ma. Vtedy na začiatku **hádeanu** (4,56 až 4,00 Ga), pred cca 4,53 Ga zrejme došlo k obrovskej zrážke Zeme s planétou o veľkosti Marsu (cca 10 % hmotnosti Zeme). Predpokladá sa, že aj táto menšia planéta vznikla v tej časti práve vytvorenej Slnečnej sústavy, kde aj Zem a krúžila po blízkej obežnej dráhe. **Gigantická zrážka Zeme a menšej planéty *(obr. 35)*** rozbila menšiu planétu na obrovské množstvo úlomkov. Zem ako podstatne väčšie a hmotnejšie teleso síce náraz prežila, ale impaktujúca planéta vnikla až do jeho



Obr. 35. *Umelecká predstava kolízie planéty veľkosti Marsu do mladej Zeme, v ktorej dôsledku vznikol Mesiac (Zdroj: www.wordlesstech.com).*

zemského plášťa, pričom došlo k jeho pretaveniu, a vyvrhla z neho obrovké množstvo materiálu. Úlomky z oboch planét vplyvom gravitácie krúžili na obežnej dráhe Zeme a v geologicky krátkom čase sa postupne stmelili do podoby Mesiaca. Práve mnohé geochemické podobnosti hornín Zeme a Mesiaca potvrdzujú tento katastrofický scenár. Počítačovým modelovaním zrážky sa odhaduje, že tento kolosálny impakt mal 10^8-krát väčšiu energiu, ako známa zrážka Zeme s úlomkom planétky na hranici druhohôr a treťohôr, ktorá spôsobila vymretie dinosaurov a mnohých ďalších foriem fauny a flóry. Neskôr sa objavili aj alternatívne teórie, napr. že po zrážke so Zemou sa vytvorili až dva mesiace, avšak ten menší bol neskôr pohltený tým väčším a tak máme v súčasnosti len jeden Mesiac.

V mladej Slnečnej sústave sa popri mladých planétach a ich formujúcich sa mesiacoch (často v dôsledku podobných obrovských impaktov) stále ešte pohybovalo veľké množstvo „nevytriedeného“ materiálu v podobe malých planétok a iných telies, rádovo veľkých km až tisícky km, ktoré sa v dôsledku vzájomnej gravitácie neustále zrážali, alebo boli priťahované väčšími telesami (napr. mladou Zemou) a narážali do nich. Tejto dobe, ktorá trvala okolo 600 až 700 Ma a skončila před asi 3,8 Ga, hovoríme **veľké bombardovanie**. Nárazy rôzne veľkých telies do Zeme a iných planét boli oveľa intenzívnejšie, ako v súčasnosti. Predpokladá sa, že vtedy bola intenzita dopadov na Zem a ostatné planéty až 500-krát vyššia, ako je v súčasnosti. V dôsledku veľkých impaktov dochádzalo k mnohonásobnému pretavovaniu tvoriacej sa kôry a plášťa Zeme, bol to dominantný proces, spôsobujúci magmatizmus a magmatickú diferenciáciu vznikajúcich hornín. Pravdepodobne najmä vďaka početným a silným impaktom v období veľkého bombardovania došlo ku konečnej stratifikácií zemského telesa na železno-niklové jadro, silikátový plášť bohatý na Mg a zemskú kôru, kde sa v dôsledku diferenciácie už v tomto ranom štádiu objavujú aj kyslé horniny granitického zloženia. Prítomnosť granitovej kôry v mladej Zemi dokazujú klastogénne zirkóny z Jack Hills v západnej Austrálií, z ktorých najstaršie majú vek až 4,4 Ga. Je zaujímavé, že v týchto zirkónoch sa lokálne našli aj uzavreniny diamantov, čo môže poukazovať buď na interakciu tenkej granitovej kôry s dominantným zemským plášťom, alebo snáď aj s početnými impaktami, keďže diamant patrí medzi typické vysokotlakové impaktné minerály. Obrovská kinetická energia impaktov väčších telies bola preto v období veľkého bombardovania podstatným spúšťačom zemského magmatizmu, popri energií zo samotnej Zeme (napr. v dôsledku rozpadu rádioaktívnych prvkov). Podľa modelových výpočtov bol energetický prínos impaktov v tomto období okolo $3 \cdot 10^{21}$ J (joulov), čo je 3-krát vyššia energia, ako sumárny tepelný tok dnešnej Zeme. Ak k tomu ešte pridáme teplo, produkované samotnou planétou, vtedajšia Zem bola podstatne teplejšia, ako dnes. Pri dopade

telies, často veľkých desiatky až stovky km mohlo dôjsť okrem lokálneho tavenia pozemských hornín aj k opakovanému vypareniu vtedajšej atmosféry, ktorá sa neustále tvorila najmä činnosťou početných vulkánov, chrliacich obrovské množstvá vulkanických plynov. Na druhej strane časť dopadajúcich asteroidov (najmä uhlíkatých chondritov) a komét obsahovala vodu a organické látky, ktoré mohli byť spúšťačom vzniku prvého života na Zemi. Vysoké teploty, agresívna atmosféra a neustále bombardovanie mimozemskými telesami však v tomto najstaršom období neumožňovali trvalejší rozvoj života. Je však možné, že nejaké exotické formy živej hmoty mohli aspoň krátkodobo fungovať už v tomto období, nemáme však pre takéto tvrdenie dôkazy. Impaktné krátery z obdobia veľkého bombardovania sa nezachovali, resp. doteraz sme nie sme schopní rozlíšiť ich stopy. Zem je od svojho vzniku príliš dynamická planéta a pôvodné, často obrovské krátery boli pravdepodobne navždy znížené počas nasledujúcich geologických pochodov, najmä subdukciach a kolíziach litosférických platní, ako aj vplyvom pôsobenia exogénnych geologických síl. Stačí sa však pozrieť na Mesiac, ktorého geologická aktivita je oveľa menšia, ako na Zemi (nikdy tam nefugovala platňová tektonika) a kde výraznejšie geologické pochody, vrátane magmatizmu takmer ustali už pred približne 3 Ga. Na Mesiaci na prvý pohľad zaujmú nápadné tzv. mesačné moria tmavej farby, čo sú obrovské, stovky až tisíce km veľké panvy - gigantické impaktné krátery z obdobia veľkého bombardovania, vyplnené bazaltovou lávou, na rozdiel od svetlejších mesačných vysočín, tvorených plutonickými horninami anortozitmi. Je však možné, že obdobné pozemské panvy impaktného pôvodu, ktoré vznikli v tomto období, mohli byť zárodky prvých oceánov (pôvodne ešte nevyplnených vodou).

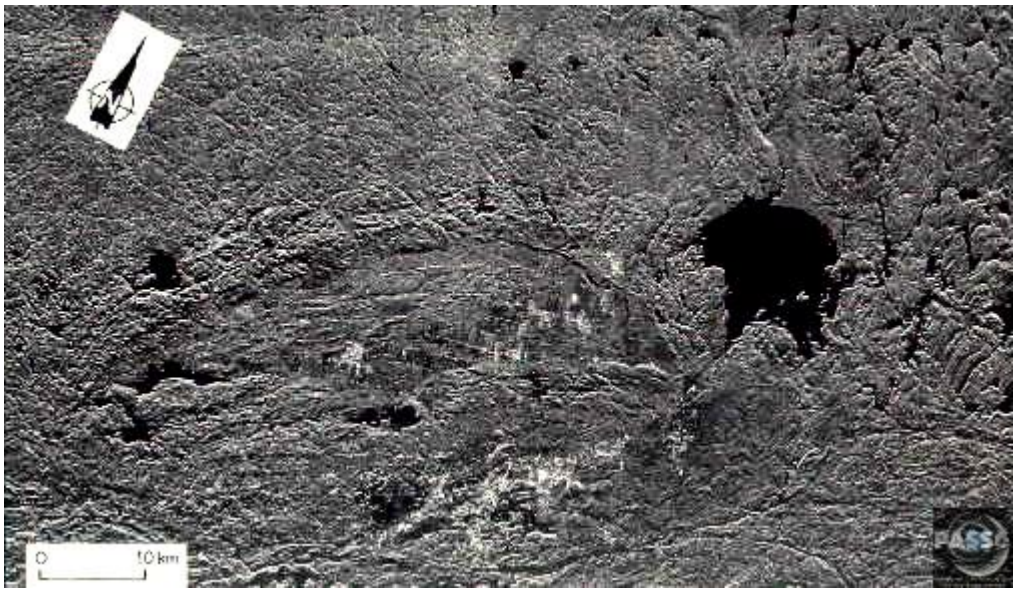
Archaikum (4,0 – 2,5 Ga) poskytuje len málo stôp po impaktných kráteroch. Približne pred 3,8 Ga postupne skončilo obdobie veľkého bombardovania; medziplanetárny priestor sa impaktami takmer úplne vyčistil od obrovského množstva malých planétok a asteroidov. Množstvo impaktov pokleslo viac ako stonásobne. Určite nie je náhoda, že práve vtedy sa na Zemi objavil trvalejší, hoci ešte len veľmi primitívny život v podobe jednobunkových organizmov (baktérií). Impaktné bombardovanie však pokračovalo a utváralo našu Zem až do dnešných čias.

Nálezy vrstiev so sférulami tavených hornín z oblasti prekambrických kratónov Pilbara (Austrália) a Kaapvaal (Juhoafrická republika), staré približne 3,47 Ga, indikujú obrovské impakty v období paleoarchaika (staršieho archaika). Pôvodné kráterové štruktúry sa však pravdepodobne už nezachovali. Doteraz najstarší možný impaktný kráter bol len nedávno zistený na JZ pobreží Grónska. Jedná sa o kruhovú štruktúru **Maniitsoq** s priemerom

približne 100 km, o ktorej sa predpokladá, že má vek okolo 3 Ga (Mezoarchaikum - stredné archaikum) a geologické indície, vrátane prítomnosti planárnych deformácií v kremeni môžu poukazovať na impaktný pôvod štruktúry. Jednoznačné dôkazy o impaktnom pôvode kruhovej štruktúry Maniitsoq však zatiaľ chýbajú. Nemáme ani dôkazy o priamom vplyve týchto impaktných udalostí na vývoj litosféry alebo masové vymieranie organizmov.

5.2. Proterozoické impakty

V nasledujúcom dlhom období vývoja Zeme – v **proterozoiku (2,5 Ga až 541 Ma)** však už máme jednoznačné dôkazy impaktného pôvodu viacerých veľkých aj menších kráterov. ***Staroproterozoický (paleoproterozoický) vek*** vykazujú najväčšie potvrdené pozemské impaktové krátery **Vredefort** v Juhoafrickej republike ***(obr. 7)***, s vekom 2,023 Ga (resp. 2023 ± 4 Ma) a priemerom minimálne 160 km (s vonkajším rozsahom impaktného postihnutia hornín až 300 km) a oválna štruktúra **Sudbury** v Kanade (1,85 Ga, resp. 1850 ± 3 Ma), s priemerom minimálne 130 km a vonkajším rozsahom impaktného postihnutia hornín až 250 km ***(obr. 36)***.



Obr. 36. *Oválny tvar impaktovej štruktúry Sudbury je z družice už len ťažko rozlíšireľný (Zdroj: Earth Impact Database; www.passc.net/ImpactDatabase/).*

Tieto dva obrovské impakty, spôsobené približne 10 až 15 km veľkými asteroidami (planétkami) mali silný devastačný účinok, ktorý bol sprevádzaný roztavením a vyparením až cca 70 km^3 hornín (Vredefort) a silným tektonickým rozbitím podložných hornín v mieste impaktu. V prípade Vredefortu niektorí autori predpokladajú, že impakt priamo geneticky

súvisel s roztavením kôrových až vrchnoplášťových hornín a k vzniku obrovskej peridotitovo-gabro-noritovej vrstevnatej intrúzie, zvanej Bushveldský magmatický komplex. V týchto horninách sú najväčšie svetové ložiská vzácnych kovov platinovej skupiny (platina – Pt, paládium – Pd, osmium – Os, irídium – Ir, ródium – Rh a ruténium – Ru), ako aj významné ložiská Fe, Cr, Ni, Ti, V, Cu a Au. Nejednoznačné datovanie hornín bushveldského magmatického komplexu (do 2,05, resp. 2050 Ma) však zatiaľ neumožňujú jednoznačnú interpretáciu príčin vzniku týchto obrovských ložísk. V prípade impaktovej štruktúry Sudbury však bol s veľkou pravdepodobnosťou preukázaný priamy vzťah medzi dopadom asteroidu, ním vyvolaným následným kompletným tavením kontinentálnej kôry a tvorbou vrstevnatej, 2,5 km hrubej noritovo-granofýrovej intrúzie a s ňou zviazaného obrovského ložiska sulfidických rúd Ni, Cu, Co, Pt, Pd, Au a ďalších kovov.

Je pravdepodobné, že veľké impakty typu Vredefort a Sudbury mohli spôsobiť aj globálne masové vymieranie vtedajších primitívnych (jednobunkových) foriem života. Priame dôkazy o tom však zatiaľ chýbajú, pretože fosílny záznam z doby staršieho a stredného proterozoika (paleo až mezoproterozoika), teda z doby pred viac ako 1 Ga je veľmi vzácny a slabo zachovaný. Ďalsie dokumentované a dokázané paleoproterozoické a mezoproterozoické impaktné krátery, zistené na starých štítoch v oblasti Ruska, Fínska Austrálie a Afriky dosahujú priemer maximálne 30 km. Len pre zaujímavosť možno uviesť, že do tohto obdobia pred zhruba 2 Ga bol zaraďovaný aj údajný Český kráter, na jeho presnejšie datovanie aj samotná existenciu však chýbajú seriózne dôkazy.

Pozoruhodná je však prítomnosť dvoch pomerne veľkých impaktných štruktúr v ***období mladšieho proterozoika (neoproterozoika)***, kroré zakončuje obdobie ediakar (636 až 541 Ma). V tomto období, zhruba od 600 Ma, máme dôkazy o prvom veľkom vzostupe mnohobunkových morských živočíchov – tzv. ediakarskej fauny z rovnomennej lokality v Austrálií. A práve z doby pred približne 600 – 590 Ma sú známe krátery **Beaverhead** na území štátov Idaho a Montana (USA) s priemerom 60 km a **Acraman** v Južnej Austrálií (priemer 90 km). Zmena prostredia, ku ktorej mohli prispieť aj pády týchto vrchnoproterozoických asteroidov, tak mohla vytvoriť vhodné podmienky pre rozvoj ediakarskej fauny. Dodnes nie sú jasné príčiny pomerne náhleho vymretia týchto organizmov na hranici proterozoika a kambria. Jednou z hypotetických príčin tejto zmeny a nástupu úplne nových kambrických organizmov by mohla byť veľká impaktná udalosť. Dokonca sa už objavili určité náznaky (napr. datovanie pseudotachylitov), že tomuto veku zodpovedá obrovská kruhová štruktúra s priemerom cca 2000 až 2200 km, ktorá zaberá celú centrálnu časť Austrálie, nazvaná Mohutná austrálska prekambricko-kambrická impaktná štruktúra

(Massive Australian Precambrian/Cambrian Impact Structure, skratka **MAPCIS**). Ak by sa potvrdil jej pôvod, bol by to najväčší známy impaktný kráter na Zemi. Samotná existencia MAPCIS však zatiaľ ostáva otázna.

5.3. Paleozoické impakty

V období **paleozoika (kambrium až perm, 541 – 252 Ma)** je doložených niekoľko silných a náhlych geologických udalostí, ktoré spôsobili veľké a rýchle zmeny v sedimentárnom zázname aj masové vymierania a razantný nástup nových foriem života. V priebehu **kambria** – najstaršieho útvaru paleozoika (541 až 485 Ma) došlo k mohutnému rozvoju života, pričom sa objavili všetky dnes známe kmene živočíchov. Známe sú najmä trilobity, morské článkonožce z triedy Trilobita. Z obdobia kambria je bezpečne doložených niekoľko impaktných kráterov, avšak len tri dosahujú veľkosť v rozmedzí 18 až 24 km (**Glikson** a **Lawn Hill** v Austrálií, **Presqu'ile** v Kanade). Takéto impakty určite spôsobili lokálnu katastrofu na rozlohe rádovo stoviek až tisícov km^2, ale nemohli mať globálny vplyv na litosféru a vývoj života na Zemi. Navyše na konci kambria ani nie je zaznamenané masové vymieranie organizmov. Naproti tomu na konci ďalšieho geologického stupňa - **ordoviku** (485 až 443 Ma) je doložené prvé veľké masové vymieranie organizmov v paleozoiku, ktoré postihlo približne 60 % zo všetkých rastlinných a živočíšnych druhov (vymrelo až 85 % morských organizmov). Masové vymieranie organizmov na konci ordoviku bolo náhle a globálne a bolo zrejme spojené s prudkou klimatickou zmenou – náhlym ochladením a čiastočným zaľadnením africkej časti prakontinentu Gondwana. Možný vplyv veľkých impaktov na vrchnoordovické masové vymieranie zatiaľ nie je priamo dokázaný, z tohto obdobia je známa iba jedna stredne veľká impaktná štruktúra - **Slate Islands** v kanadskom Ontariu, ktorá má priemer 32 km a vrchnoordovický vek okolo 450 Ma. Nepresne datovaný impaktný kráter **Charlevoix** v kanadskom Québecu s priemerom 54 km (470 – 400 Ma) mohol tiež súvisieť s vrchnoordovickým vymieraním a zmenami klímy (pokiaľ nie je mladší – silúrsky až spodnodevónsky).

Po relatívne krátkom a kľudnom období **silúru** (443 až 419 Ma), došlo v nasledujúcom období – v **devóne** (419 – 359 Ma) k dopadom najmenej dvoch väčších asteroidov a k dvom veľkým masovým vymieraniam organizmov. Všetky tieto udalosti sa udiali vo vrchnom devóne. Pred 377 ± 2 Ma dopadol na územie dnešného stredného Švédska asteroid, ktorý vystvoril kráter **Siljan** s priemerom 52 km. Ešte väčšie teleso, približne 5-6 km

veľký asteroid vytvoril pred 364 ± 8 Ma kráterovú štruktúru **Woodleigh** v Západnej Austrálii s priemerom 40 až 120 km. Práve v tomto období, na hranici stupňov frasn a famen

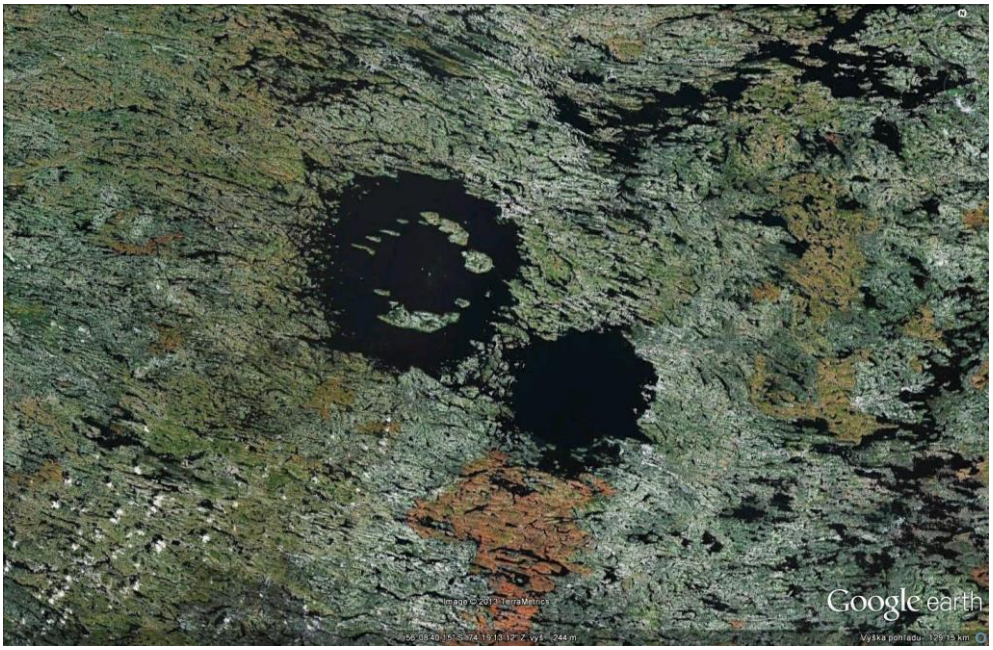
Obr. 37. *Kráter Aorounga (priemer 12,6 km). Jeho maximálny vek je 345 Ma (Zdroj: Google Earth, výška 24,5 km).*

(372 ± 2 Ma) došlo k prvému devónskemu masovému vymieraniu organizmov: vyhynulo do 60 % druhov, najmä v oblasti dnešnej Číny, Austrálie, Severnej Ameriky a Európy, predovšetkým konodonty, ramenonožce, amonity a ostrakódy. Bezprostrednou príčinou vymierania bola zrejme náhla globálna zmena podnebia na Zemi, spojená s prudkým ochladením a čiastočným zaľadnením. Na možný impaktný pôvod tohto masového vymierania však poukazujú anomálie „kozmického kovu“ – irídia v hraničnej vrstve medzi frasnom a famenom (0,2 – 0,3 ppm Ir, čo je cca 10 x viac, ako bežné hodnoty), zistené na profiloch v Európe, Číne aj Austrálií, ako aj nálezy mikrotektitov v Číne. Druhé masové vymieranie ohraničuje samotný devón a nasledovný útvar karbón pred 359 Ma. Vtedy vymreli mnohé druhy trilobitov a amonitov. Časová korelácia oboch týchto masových vymieraní (extinkcií) s vekom krátera Siljan a Woodleigh zatiaľ nie je úplne jasná, avšak zvýšená frekvencia impaktov na konci devónu (sú známe aj ďalšie menšie krátery z tohto obdobia) mohla prispieť k celkovej biologickej kríze a podporiť obe vrchnodevónske extinkcie.

Z obdobia **karbónu** (359 až 299 Ma), presnejšie zo spodného karbónu (mississip, 359 až 323 Ma) sú potvrdené impaktové štruktúry na Sahare v Čade: **Gweni-Fada** (priemer 14 km) a **Aorounga** (priemer 12,6 km) – ***obr. 37***; ich maximálny vek je 345 Ma. Okrem nich

boli v oblasti Aorounga zistené aj ďalšie tri kruhové štruktúry, možno impaktného pôvodu. Je preto možné, že sa jednalo o meteoritický dážď fragmentov z jedneho rozpadnutého asteroidu.

Na hranicu vrchného karbónu (pennsylvan, 323 až 299 Ma) a **permu** (299 až 252 Ma), resp. až do spodného permu boli datované dve susediace kruhové štruktúry impaktného pôvodu, vyplnené jazerami – **Clearwater Lake West** (priemer 36 km) a **Clearwater Lake East** (26 km) pri Hudsonovom zálive v Kanade ***(obr. 38)***; ich vek bol stanovený na 290 ± 20 Ma. Je pravdepodobné, že dopadajúci asteroid sa počas preletu zemskou atmosférou rozpadol



Obr. 38. *Impaktné krátery Clearwater Lake West (priemer 36 km) a Clearwater Lake East (26 km) pri Hudsonovom zálive v Kanade. (Zdroj: Google Earth, výška 129 km).*

na dva veľké úlomky. Počas dlhšieho permského obdobia nemáme dosiaľ dôkazy o existencii impaktných kráterov väčších ako 11 km v priemere. Ani sedimentárny záznam nepoukazuje na náhle katastrofické udalosti.

Avšak pred 252,2 ± 0,5 Ma došlo na Zemi k jednej z najvýraznejších prudkých geologických zmien. Detailné sedimentologické výskumy indikujú, že k tejto zmene došlo v priebehu rádovo 10 až 100 tisíc rokov, po stále záhadnej katastrofickej udalosti. Došlo k najväčšiemu známemu náhlemu masovému vymieraniu organizmov: v moriach vyhynulo až 96 % a na kontinentoch 70 % všetkých druhov rastlín a živočíchov. Úplne vymreli trilobity, ktoré boli na ústupe už od karbónu, vyhynula väčšina druhov koralov, machoviek, ramenonožcov, ľalioviek, amonitov. Na súši prežila len desatina druhov plazov, vymrela papraďovitá glossopterisová flóra, ktorá dominovala počas permu. Táto udalosť je

v paleontologickom zázname tak výrazná, že už v 19. storočí viedla geológov k stanoveniu hranice medzi paleozoikom a mezozoikom (prvohorami a druhohorami) a súčasne aj permom a triasom práve sem. Príčina takého obrovského, globálneho a rýchleho vymierania organizmov však dodnes nie je objasnená. V súčasnosti sú dva základné názory na permsko-triasové, resp. paleozoicko-mezozoické masové vymieranie: jedná sa buď o dôsledok obrovskej vulkanickej aktivity alebo o následok veľkého impaktu, resp. viac-menej súčasnej série impaktov.

Zástancovia vulkanickej teórie sa opierajú o prítomnosť veľmi mohutnej vulkanickej činnosti, ktorá je dokumentovaná práve na hranici permu a triasu v oblasti dnešnej Sibíri v Rusku. Tzv. **sibírske trapy** predstavujú mnohonásobné lávové prúdy bazaltov, hrubé až 3,5 km, ktoré sa rozprestierajú na ploche okolo 2 milióny km^2 (plocha porovnateľne veľká ako ostrov Grónsko). Odhaduje sa, že táto výnimočne intenzívna vulkanická aktivita mohla vyprodukovať 3 až 5 miliónov km^3 bazaltovej lávy. Obrovské množstvo vulkanického popola a plynov, bohatých na oxidy síry, metán a oxid uhličitý muselo mať globálne následky na zemskú atmosféru a hydrosféru, ako aj následnú rýchlu zmenu celosvetovej klímy. Uvažuje sa dokonca aj o ničivej explózií nahromadeného metánu v svetových oceánoch. V každom prípade tieto vplyvy mali devastačný účinok na organizmy, ktoré sa nestačili prispôsobiť nárastu skleníkových plynov, rapídnemu poklesu kyslíka a ďalším vyvolaným zmenám. Vulkanická teória má však nedostatok vo fakte, že mohutná vulkanická činnosť sibírskych trapov nebola jedna náhla udalosť, ale séria výlevov, ktorá mohla trvať viac ako 1 milión rokov.

Aj preto za hlavnú príčinu persmko-triasového vymierania považujú zástancovia impaktnej teórie práve dopad jedného alebo viacerých obrovských asteroidov, rádovo o veľkosti najmenej 10 km. Hlavným problémom impaktnej hypotézy však je, že sa dosiaľ nenašiel príslušný veľký kráter alebo viac kráterov s vekom okolo 250 Ma. Z tohto obdobia je známy relatívne veľký kráter **Araguinha** v Brazílií s priemerom 40 km a vekom 254,7 ± 2,5 Ma a menšia impaktná štruktúra **Kursk** v Rusku s priemerom 6 km. Špekuluje sa však aj o impaktnom pôvode štruktúry **Bedout High** s priemerom 200 km, objavenej na základe interpretácie geofyzikálnych údajov v Indickom oceáne severozápadne od pobrežia Austrálie, alebo údajný kráter s priemerom 193 km tiež v Indickom oceáne medzi Antarktídou a Austráliou, či až 485 km veľká kruhová štruktúra vo **Wilkesovej zemi** v Antarktíde. Konečný dôkaz impaktného pôvodu týchto štruktúr (napr. prítomnosť šokového kremeňa, coesitu, stišovitu, diamantu, pseudotachylitov alebo impaktnýh brekcií) však stále chýba. Možný obrovský impakt však na druhej strane podporujú nálezy mikroskopických sférulí

s diopsidom a spinelom, obohatenom Cr, ako aj lokálne zvýšené obsahy Ir (irídia), ako aj fullerénu (forma uhlíka - C_{60}), ktorý môže indikovať rozsiahle lesné požiare na pevninách po dopade asteroidu. Každopádne presná príčina najväčšej masovej extinkcie organizmov pred 252 Ma je stále neznáma. Pribúdajú však názory, že masové vymieranie mohol spôsobiť kombinovaný efekt vulkanizmu a súčasného dopadu veľkého asteroidu (série asteroidov).

5.4. Mezozoické impakty

V období **triasu** (252 až 201 Ma) po veľkom vymieraní došlo k postupnej regenerácii organizmov a k nástupu novej generácie rastlín a živočíchov. Pokračovali však aj ničivé dopady kozmických telies. Intenzita veľkých impaktov nápadne vzrástla vo vrchnom triase; čo dokumentuje kruhová štruktúra **Saint Martin** v kanadskej Manitobe (priemer 40 km, vek 220 ± 32 Ma) a najmä obrovský kráter **Manicouagan** v Québecu (Kanada) s priemerom 85 až 100 km a vekom 214,5 Ma ***(obr. 39)***.

Obr. 39. *Impaktná štruktúra Manicouagan v Kanade (Zdroj: Google Earth, výška 174 km).*

Posledný veľký triasový impakt sa udial pred 201,4 ± 2,4 Ma, čo dokumentuje kruhová štruktúra **Rochecouart** vo Francúzsku s priemerom 23 km. Je zaujímavé, že vek tejto štruktúry sa výborne zhoduje s vekom hranice trias-jura (201,3 ± 0,2 Ma), ktorá opäť predstavuje náhle masové vymieranie organizmov. Vyhynula vtedy asi polovica druhov

suchozemských organizmov a okolo 60 až 70 % morských živočíchov (koraly, amonity, mäkkýše, ichtyosaury a plakodonty). Vymreli mnohé skupiny plazov, ktoré tak uvoľnili cestu rozvoja dinosaurov. Výrazný je tiež sedimentárny záznam tejto udalosti; v hraničnej vrstve medzi triasom a jurou boli na viacerých miestach nájdené sférule (napr. v Anglicku a dokonca aj v slovenských Tatrách), boli zaznamenané aj zmeny izotopov kyslíka a uhlíka, lokálne aj šokové kremene, ktoré by mohli byť spojené s kráterom Rochecouart. Na druhej strane na rozhraní triasu a jury bola aj zvýšená sopečná aktivita s mohutnými výlevmi bazaltových láv v oblasti vznikajúceho stredného Atlantiku s odhadovanou plochou až 10 miliónov km^2. Možno teda predpokladať, že aj masové vymieranie na hranici triasu a jury bolo spôsobené kombinovaným efektom produktov rozsiahlej vulkanickej činnosti, aspoň v oblasti Európy, podporenou aj dopadom asteroidu Rochecouart.

Ani nasledujúci geologický útvar mezozoika – **jura** (201 až 145 Ma) nebol ušetrený od dopadov väčších úlomkov asteroidov. V strednej jure je preukázaný 40 až 80 km veľký impaktný kráter **Pučež-Katunki** v Rusku, datovaný na 167 ± 3 Ma. Kráter **Morokweng** (Juhoafrická republika) má priemer 70 km a vek 145,2 ± 0,8 Ma, čo je znova v nápadnej zhode so stratigrafickou hranicou jury a kriedy (145,0 ± 0,8 Ma), keď náhle vymrelo vyše 30 % morských organizmov a na súši vyhynuli niektoré významné druhy veľkých dinosaurov (napr. Allosaurus, Stegosaurus a Apatosaurus). Blízko hranice jura-krieda je aj relatívne veľká impaktová štruktúra **Mjølnir**, objavená v Barentsovom mori, severne od pobrežia Nórska. Tento podmorský kráter má priemer okolo 40 km a vek 142,0 ± 2,6 Ma a taktiež kráter **Gosses Bluff** v Austrálii s priemerom 22 km a vekom 142,5 ± 0,8 Ma ***(obr. 40)***. Znova sa tak ponúka možný dôsledok impaktov na masové vymieranie organizmov.

Obr. 40. *Kráter Gosses Bluff (Austrália), priemer 22 km (Zdroj: Google Earth, výška 53 km).*

Obdobie **kriedy** (145 až 66 Ma) je mimoriadne bohaté na impaktné udalosti. Okrem viacerých zistených malých kráterov (priemer do 20 km) sem spadá 5 relatívne veľkých kráterov: do spodnej kriedy možno zaradiť štruktúru **Tookoonooka** v Austrálii (priemer 55 km, 128 ± 5 Ma) a **Carswell** v Kanade (39 km, 115 ± 10 Ma), vo vrchnej kriede je to **Steen River** v provincii Alberta v Kanade (25 km, 91 ± 7 Ma), **Lappajärvi** vo Fínsku (23 km, 76,2 ± 0,27) a **Manson** v USA (35 km, 73,8 ± 0,3 Ma). Geologický záznam až po najvrchnejšiu kriedu nepoukazuje na globálne dôsledky impaktov na vývoj zemskej kôry, klímu a pozemské organizmy. Určité stopy impaktnej udalosti boli zaznamenané len v hraničnej vrstve cenoman-turón (93,9 Ma), kde boli pri Nazaré v Portugalsku nájdené prejavy šokovej metamorfózy a obohatenie Ir. Konkrétny kráter však dosiaľ nebol zistený, vekove by mu mohol zodpovedať len kanadský kráter Steen River.

5.5. Impakty na hranici mezozoika a kenozoika

Rozhranie mezozoika a kenozoika (druhohôr a treťohôr), resp. kriedy a terciéru (tzv. **K-T hranica**) pred 66,0 Ma patrí medzi najvýraznejšie geologické hranice v geologickej histórií Zeme. V geologicky veľmi krátkej dobe (roky až desaťtisíce rokov) vtedy došlo k mohutnému globálnemu masovému vymieraniu organizmov a prudkej zmene klímy. Paleontológovia si už pred dvesto rokmi všimli túto náhlu zmenu foriem fosílií, keď vymreli viaceré nápadné a rozšírené skupiny živočíchov, najmä populárne dinosaury, amonity a väčšina belemnitov. Naopak v geologických vrstvách, mladších jako K-T hranica, sa rýchlo objavili a rozšírili úplne nové živočíšne formy – vtáky (ktoré dnes považujeme za jediných príbuzných dinosaurov) a najmä cicavce, ktoré ovládli kontinenty namiesto dinosaurov. Práve preto je K-T hranica medzi mezozoikom a terciérom kladená na toto nápadné rozhranie. Paleontológovia vypočítali, že na hranici K-T vymrela približne polovica rodov a dokonca až 75 % všetkých druhov vrchnokriedových organizmov. Na súši neprežili takmer žiadne živočíchy s hmotnosťou nad 25 kg, prežilo však vyše 50 % druhov cicavcov a dokonca aj niketoré primitívne formy plazov (krokodíly, hatérie, korytnačky, jašterice). Naopak v moriach vymrelo až 90 % najmenších organizmov – planktónu. Menej bola postihnutá svetová flóra, aj tu však vymrelo cca 30 % všetkých rodov vyšších rastlín. Aká bola príčina katastrofického globálneho vymierania organizmov na hranici K-T ?

Vedci hľadajú príčiny už desiatky rokov. Príčiny sa hľadali najmä v biogénnych a klimatických faktoroch. Ťažko však bolo vysvetliť fakt, čo mohlo spôsobiť tak rýchle a

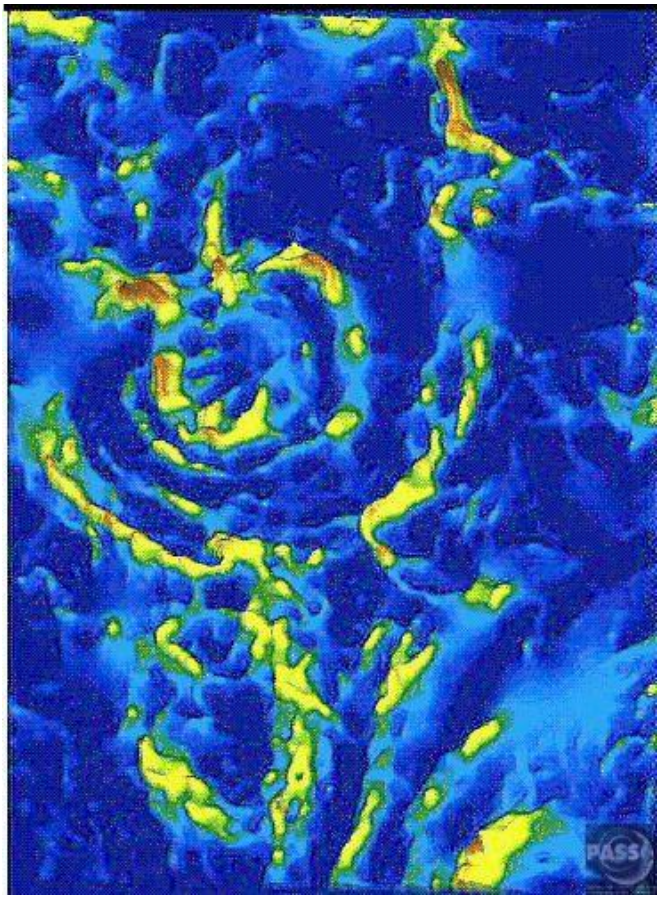
pritom celosvetové vymieranie. Je zaujímavé, že podobne, ako na hranici permu a triasu, aj na konci kriedy je dokumentovaná nebývale silná vulkanická aktivita tzv. **dekanských trapov** v dnešnej západnej Indii. Tieto mohutné bazaltové výlevy láv majú hrúbku až 3500 m a vyskytujú sa na ploche okolo 500 tisíc km^2. Je nepochybné, že úniky obrovského množstva vulkanických plynov (oxidy síry, metán, oxid uhličitý) mohli mať zničujúce účinky na celosvetovú klímu, mohli vyvolať skleníkový efekt, pokles koncentrácie kyslíka v ovzduší, ako aj náhle zmeny hladiny morí, čo následne viedlo k vymieraniu morských aj suchozemských organizmov. Na druhej strane sa preukázalo, že bazaltový vulkanizmus dekanských trapov fungoval v podobe niekoľkých samostatných pulzov približne 1 milión rokov. Určite tak mal podstatný vplyv na celosvetové zmeny podnebia a tým aj na masové vymieranie organizmov. Vytvorilo sa veľmi nepriaznivé podnebie, ktoré globálne vytváralo veľký tlak na prispôsobenie sa pre všetky formy života. Avšak „konečnú smrteľnú ranu“ musela spôsobiť ešte ďalšia globálna a hlavne náhla udalosť. Len tak možno vysvetliť K-T hranicu a náhlosť vymierania rádove v stovkách až desaťtisícov rokov.

Ako najlogickejšie vysvetlenie prudkej globálnej udalosti na hranici K-T sa ponúka katastrofický impakt veľkého asteroidu, ktorého energia spôsobila okamžité ničivé dôsledky na celej Zemi. S kozmickou (extraterestriálnou) hypotézou na vysvetlenie príčiny K- udalosti prišli r. 1980 americkí vedci na čele s L. Álvarezom (nositeľom Nobelovej ceny) a jeho synom W. Álvarezom. Ich teória vychádzala zo zistenia anomálne vysokých koncentrácii irídia a ostatných prvkov skupiny platiny (PGE, teda Pt, Ir, Os, Rh, Re, Pd) v tenkej vrstve ílovitých sedimentov priamo na hranici K-T ***(obr. 41)***. Koncentrácie Ir v tejto vrstve boli

Obr. 41. *Hraničná vrstva K-T (čierna). Raton Pass, Colorado, USA (Zdroj: www.newswarch.nationalgeographic.com).*

zvýšené 5 až 330 násobne oproti bežným obsahom tohto na Zemi veľmi vzácneho prvku. Koncentrácie Os a Pd dosahovali dokonca až 1000 násobok bežných pozemských sedimentov. Uvažovalo sa preto o mimozemskom, teda kozmickom pôvode týchto prvkov, dokonca sa špekulovalo o zdroji pri výbuchu masívnej hviezdy – supernovy mimo našej Slnečnej sústavy. Takéto koncentrácie PGE, ako aj pomer izotopov irídia – $^{191}Ir/^{193}Ir$ sú však analogické hodnotám, známym v meteoritov a z kozmickému prachu, ktorý stále dopadá na Zem, s pôvodom z našej Slnečnej sústavy. Čas sedimentácie tejto tenkej vrstvy ílu bol geologicky veľmi rýchly (rádovo menej ako 10 tisíc rokov), takže uvedená anomálne vysoká koncentrácia týchto prvkov sa musela vytvoriť ich náhlym prísunom a nie pomalým a stálym spadom kozmického prachu. A tento náhly prísun kozmogénnych prvkov je najlogickejšie vysvetliteľný práve dopadom veľkého množstva kozmického materiálu – impaktom veľkého úlomku asteroidu. Výpočty ukázali, že sa muselo jednať o množstvo, zodpovedajúce asteroidu o veľkosti až 10 km. Je pravdepodobné, že toto obrovské mimozemské teleso pri dopade explodovalo a jeho častice museli byť rozptýlené po celom povrchu Zeme.

Naozaj, po systematickom hľadaní boli K-T hraničné, irídiom a PGE obohatené vrstvy, lokálne spolu s prejavmi šokovej metamorfózy, mikrotektitov (sférul) a vysokej koncentrácií uhlíka nájdené na desiatkach lokalít po celom svete (napr. v Taliansku, Dánsku, Španielsku, Novom Zélande, Tunisku, USA, Kanade atď.). Nutne sa preto jednalo o dopad obrovského telesa, ktoré spôsobilo globálne katastrofické prejavy na celom svete. Najväčším problémom impaktovej hypotézy však bola neprítomnosť vhodného obrovského krátera, ktorý musel mať priemer najmenej 100 km. Tento kráter však bol nakoniec v r. 1990 identifikovaný v podobe obrovskej kruhovej štruktúry **Chicxulub** v oblasti mexického polostrova Yucatan a najmä priľahlého mora v Mexickom zálive; jej priemer je udávaný v intervale 150 až 200 km ***(obr. 42)***. Kráter Chicxulub bol zistený počas vrtného prieskumu mexickej ropnej spoločnosti Pemex. Dnes už je k dispozícií obrovské množstvo údajov z vrtov, ako aj geofyzikálnych meraní, ktoré jednoznačne preukázali impaktný pôvod tejto kruhovej štruktúry, najmä mohutné impaktné brekcie s maximálnou hrúbkou až 3 km, prejavy šokovej metamorfózy v kremeni, impaktné taveniny andezitového zloženia, anomálne obsahy Ir, ako aj negatívne gravimetrické anomálie. Na základe najnovšieho datovania je vek chicxulubského impaktu 66,07 ± 0,37 Ma, čo veľmi dobre zodpovedá súčasnej spresnenej hodnote stratigrafickej hranice K-T s hodnotou 66,0 Ma (Medzinárodná chronostratigrafická škála z roku 2012). Neskoršie výsledky z oblasti širšieho okolia krátera Chicxulub v Mexickom zálive, Haiti a na Kube podporili impaktný pôvod štruktúry početným nálezmi drobných sférul (gulôčok), tzv. haitského skla, ktoré môžeme interpretovať ako špecifické mikrotektity, ktoré vznikli



Obr. 42. *Impaktná štruktúra Chicxulub v Mexickom zálive, geofyzikálna gravimetrická mapa (Zdroj: Earth Impact Database; www.passc.net/ImpactDatabase/).*

kondenzáciou roztavených a vyparených hornín v bezprostrednej oblasti Chicxulubu. Výskum hraničnej vrstvy K-T na lokalitách po celom svete však priniesol ďalšie mineralogické dôkazy o katastrofickej impaktnej udalosti, najmä prítomnosť veľmi drobných diamantov (tzv. nanodiamantov s veľkosťou len 3 až 5 nm – nanometrov, teda 3 - 5 . 10^{-9} m) a spinelov, obohatených Ni. Okrem samotného kráteru Chicxulub bola v jeho okolí neskôr zistená aj kruhová štruktúra Chicxulub II s priemerom 100 km, ktorej impaktný pôvod však nie je dokázaný. Navyše je nápadné, že s obdobím K-T sa časove prekrýva, resp. blíži aj zistený vek ďalších pomerne veľkých impaktných kráterov **Kara** v Rusku (65-120 km, 67,27 ± 1,89 Ma) a **Boltyš** na Ukrajine (24 km, 65,82 ± 0,74 Ma). Možno sa teda jednalo o viac-menej súčasnú sériu veľkých impaktov, pôvodom možno z jedneho veľkého asteroidu.

Na základe súčasných poznatkov možno konštatovať, že impaktujúci úlomok chicxulubského asteroidu na hranici K-T mal veľkosť približne 10 ± 4 km, teleso zrejme priletelo rýchlosťou okolo 20 km/s (cca 70 000 km/h) pod uhlom 20-30° od juhovýchodu, pričom uvoľnená energia dopadu bola okolo 5 . 10^{23} J (joulov), čo zodpovedá sile výbuchu

rádovo 100 miliónov megaton TNT (výbušniny tri-nitro-toluénu). Pri výbuchu dopadajúceho asteroidu bol vyhĺbený primárny kráter s priemerom asi 90 km a hĺbkou 30 km. Dopad do mora v oblasti Mexického zálivu vyvolal gigantickú vlnu tsunami s výškou možno až 1 km, ktorá v priebehu niekoľkých hodín devastovala milióny km^2 najmä v pobrežných až vnútrozemských oblastiach Severnej a Južnej Ameriky, v menšej miere aj ostatných kontinentov a ostrovov. Kozmické teleso však dopadlo aj na podmorské až pobrežné karbonátové horniny s polohami sadrovca, pričom došlo k okamžitému termálnemu rozkladu uhličitanu a síranu vápenatého a úniku obrovského množstva oxidu uhličitého a siričitého do atmosféry (odhaduje sa vyše $5 \cdot 10^{11}$ t CO_2 a $2 \cdot 10^{11}$ t SO_2). Aerosoly prekryli celú zemskú atmosféru a pri dopade horúcich čiastočiek späť na kontinenty došlo k početným obrovským požiarom lesov a možno aj časti akumulácií fosílneho uhlia, čo jasne dokazujú anomálne zvýšené koncentrácie jemne dispergovaného uhlíka (sadzí) v rámci K-T vrstvy. Energia dopadu mohla prehriať vrchnú 30 m vrstvu svetového oceánu až o 13 °C. Vplyv vysokých koncentrácií SO_2, CO_2, ako aj vznikajúcich aerosolov kyseliny sírovej a dusičnej a sadzí z požiarov mohol byť spúšťačom skleníkového efektu a prudkého zvýšenia teplôt o viac ako 10 °C, avšak po 500 až 1000 rokoch od impaktu sa opäť predpokladá silné globálne ochladenie. V takýchto katastrofických podmienkach bezprostredne počas niekoľkých hodín až dní mohlo zahynúť veľké množstvo organizmov. Ďalšie vyhynuli v priebehu rokov až tisícov rokov dôsledku prudkého oteplenia a následného ochladenia, toxického účinku atmosféry a hydrosféry, kyslých dažďov a výrazného narušenia fotosyntézy vplyvom požiarov a zatienenia Slnka.

Ako už bolo spomenuté, svetový ekologický systém bol silne narušený už pred chicxulubským dopadom vplyvom silnej vulkanickej činnosti dekkanských bazaltových trapov. Svedčí o tom začiatok masovejšieho vymierania niektorých druhov už v priebehu najvrchnejšej kriedy. Avšak tvrdenie niektorých zástancov vulkanickej teórie masového vymierania na hranici K-T, že k dopadu asteroidu v Chicxulube došlo už približne 300 tisíc rokov pred samotným koncom kriedy, nebolo najnovšími meraniami potvrdené. Naopak, veková zhoda impaktných hornín Chicxulubu a stratigrafickej hranice K-T je veľmi dobrá (chyba rádovo pod 0,01 Ma). A tak sa na základe súčasných poznatkov ako najpravdepodobnejší scenár tejto katastrofickej udalosti javí kombinovaný efekt mohutného dekkanského vulkanizmu a obrovského impaktu, resp. série impaktov Chicxulub, Kara a Boltyš.

5.6. Kenozoické impakty

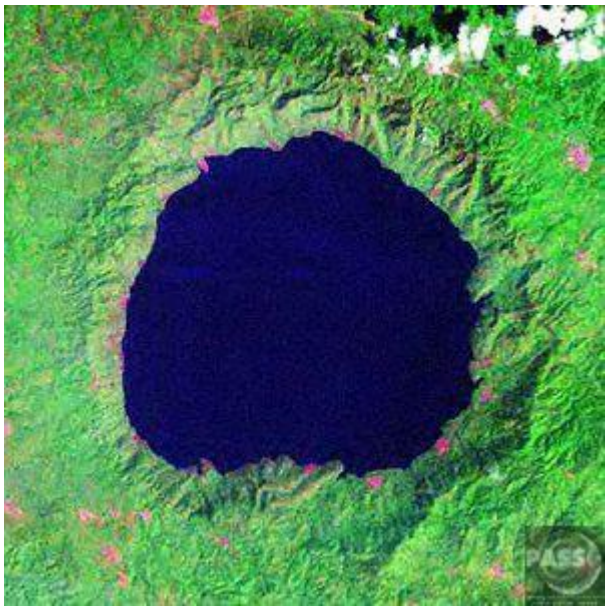
Obdobie kenozoika, teda **terciéru až kvartéru** (treťohôr až štvrtohôr) je najmladšie geologické obdobie, ktoré začalo po K-T udalosti pred 66 Ma a trvá dodnes. V tomto období už nedošlo k žiadnemu podobnému globálnemu masovému vymieraniu organizmov a nemáme ani doložený žiadny impaktný kráter s priemerom väčším ako 100 km. Je pozoruhodné, že najväčšie kenozoické impaktné štruktúry sa koncentrujú do dvoch časovo blízkych období v **paleogéne**, presnejšie v **eocéne** (56,0 až 33,9 Ma). Jedná sa o spodnoeocénne krátery **Montagnais** v Kanade (priemer 45 km, vek 50,50 ± 0,76 Ma) a **Kamensk** v Rusku (25 km, 49,0 ± 0,2 Ma), ako aj skupinu stredne až vrchnoeocénnych impaktných štruktúr, kde patria kanadský **Haughton** (23 km, cca 39 Ma) a **Mistastin** (28 km, 36,4 ± 4 Ma), **Chesapeake Bay** v USA (40-90 km, 35,67 ± 0,28 Ma), ako aj najväčší, „diamantonosný“ kráter **Popigaj** v Rusku (90-100 km, 35,7 ± 0,2 Ma) – ***obr. 43***. Najmä

Obr. 43. *Odkryvy s impaktnými brekciami, kráter Popigaj v Rusku (Zdroj: www.fas.org).*

v období vrchného eocénu máme v sedimentárnom zázname zaznamenané severoamerické tektity (bediasity, georgianity) a mikrotektity, prítomnosť šokovo postihnutého kremeňa, coesitu, ako aj vysoké obsahy Ir. Vrchnoeocénne impakty sa preto mohli podielať menšom masovom vymieraní niektorých skupín organizmov v tejto dobe, ktoré postihlo napr. morský planktón, mäkkýše a niektoré skupiny cicavcov.

V období mladšieho terciéru, **neogénu** (23,03 až 2,59 Ma) máme dokumentovaný impaktný kráter Karakul v Tadžikistane s priemerom 52 km (vek pod 25 Ma) a nám najbližší kráter Ries v nemeckom Bavorsku s priemerom 24 km a **miocénneho** veku (14,83 ± 0,15 Ma), s ktorým sú geneticky späté české tektity – vltavíny. S neogénnymi impaktami už nie je spojené žiadne výraznejšie vymieranie organizmov, aj keď sú doložené isté náznaky úbytku druhov v strednom miocéne, pred zhruba 15 Ma. Z pliocénu, najmladšej epochy neogénu, je doložený kráter **Eľgygytgyn** v Rusku s priemerom 18 km a vekom 3,5 ± 0,5 Ma.

Kvartér (2,59 Ma až súčasnosť) je už dobou vývoja priamych predkov človeka v línií Homo habilis, H. erectus až H. sapiens. Ani praveký človek nebol ušetrený lokálnym dôsledkom pádov menších asteroidov. Najväčšie dokumentované impaktné štruktúry, ktoré už člověk mohol zaznamenať, sú **Bosumtwi** v africkej Ghane (priemer 10,5 km, vek 1,13 ± 0,10 Ma) – ***obr. 44*** a **Žamanšin** v Kazachstane (14 km, 0,9 ± 0,1 Ma). S oboma impaktami sú spojené nálezy impaktných skiel – tektitov (ivority, irgizity, možno aj australity). Ďalšie doložené kvartérne impaktné štruktúry sú menšie ako 2 km a ich dopad mohol spôsobiť len lokálne katastrofy.



Obr. 44. *Jazero Bosumtwi vypĺňa rovnomenný impaktný kráter o priemere 10,5 km z družice LANDSAT (Zdroj: Earth Impact Database; www.passc.net/ImpactDatabase/).*

Napriek tomu sa uvažuje, že pred približne 12 tisíc rokmi, na konci poslednej doby ľadovej a súčasne hranici kvartérnych stupňov **pleistocénu** a **holocénu**, explodovala nad Severnou Amerikou kométa s priemerom jadra 1,6 km, ktorej výbuch mal za následok

vymretie viacerých druhov veľkých severoamerických cicavcov a dokonca aj populácie pravekých ľudí tzv. **cloviskej kultúry** na území dnešných USA. A práve v tejto dobe vymrel aj trpaslíči ľudský druh Homo floresiensis z ostrova Flores v Indonézií. Aj keď nemáme k dispozícií príslušný kráter (teleso mohlo explodovať v atmosfére bez dopadu na zemský povrch), vedci objavili vo vrstve, zodpovedajúcej veku 12 tisíc rokov na cca 50 lokalitách cloviskej kultúry v Severnej Amerike stopy kozmickej udalosti: sféruly, sklovité materiály, fullerény (častice C_{60}) a dokonca aj diamanty. Asi před 5 tisíc rokmi dopadol meteoritický dážď do oblasti obce **Morasko** v Poľsku, pričom vzniklo 7 malých kráterov o veľkosti do 100 m ***(obr. 45).***

Obr. 45. *Jazero na mieste najväčšieho impaktného krátera Morasko v Poľsku s priemerom okolo 100 m (Zdroj: Earth Impact Database; www.passc.net/ImpactDatabase/).*

V historickom období sú zaznamenané ničivé dopady meteoritov v legendách a kronikách; napr. okolo roku 3000 pred n. l. „deväť drakov“ zabilo „žltého cisára“ a zničilo město Huangling v provincii Šen-si v Číne. Skutočne tam bol v r. 2002 nájdený príslušný meteorit. Miesto dopadov meteoritov v **Kaalijärv** na estónskom ostrove Saarema v období medzi rokmi 800 a 400 pred n. l., ktoré vyhĺbili 9 kráterov o veľkosti 12 až 110 m, sa stalo posvätným okrskom v dobe železnej a je dokonca pravdepodobne zaznamenané aj v starofínskom epose Kalevala. Možné impaktové štruktúry z obdobia holocénu až historického obdobia boli identifikované v Severnom mori, na pobreží Mexika, východnej Austrálie a južného cípu Nového Zélandu (štruktúra **Mahuika**, ktorá má údajne priemer až 24 km). Jasné dôkazy o impaktnom pôvode týchto štruktúr a ich presnejšie datovanie však zatiaľ chýbajú.

Dňa 30. júna 1908 došlo k výbuchu bližšie neznámeho kozmického telesa nad sibírskou tajgou v neosídlenej oblasti rieky **Tunguzka** v jakutskej časti Sibíri v Rusku. Napriek desiatkam vedeckých expedícií sa dodnes nepodarilo presne zistiť príčinu tejto

udalosti, ktorá nezanechala žiadny impaktný kráter, zato však úplne zničený les na ploche asi 2150 km^2. Nepatrné mikroskopické fragmenty však naznačujú, že sa pravdepodobne jednalo o málo súdržný, pórovitý silikátový meteorit (úlomok asteroidu, alebo jadro kométy), veľký 60 až 100 m, ktorý explodoval vo výške 6 až 9 km nad zemou. Podobné dopady kozmických telies (meteoritov) boli veľakrát zaznamenané človekom, ale v žiadnom prípade sa už nejednalo o impakt väčších rozmerov, ktorý by ohrozil pozemský život, alebo mal vplyv na podnebie alebo dokonca vývoj litosféry.

5.7. Príčiny a riziká zrážky v minulosti a budúcnosti

Ako vyplýva z prechádzajúcich kapitol, planéta Zem, tak ako každé teleso vo vesmíre, sa podriaďuje zákonom gravitácie, inak povedané, je neustále konfrontované so zrážkami iných kozmických telies. Intenzívna geologická činnosť na Zemi však stopy týchto zrážok – najmä impaktné krátery úspešne a pomerne rýchlo zahladzuje. Napriek tomu už v dnešnej dobe niet najmenších pochýb, že Zem bola vo svojej geologickej histórií bombardovaná zrážkami s telesami najrôznejších veľkostí, často až kilometrových rozmerov. Takéto impakty zanechali okrem samotných kráterov a zmien v najvrchnejšej časti litosféry aj stopy v podobe globálnych biologických katastrof – masových vymieraní organizmov. Dnes vieme, že počas fanerozoika (kambrium až súčasnosť), teda v období za posledných cca 540 Ma, došlo k piatim veľkým masovým vymieraniam, keď zahynulo najmenej 50 % druhov organizmov: (1) na konci ordoviku (pred 443 Ma), (2) na hranici frasn-famen v devóne (372 Ma), (3) na konci permu (252 Ma), (4) na hranici triasu a jury (201 Ma) a napokon (5) na konci kriedy (66 Ma). Okrem nich však paleontológovia zaznamenali ešte okolo 25 menších vymieraní. Je zrejmé, že aspoň časť týchto náhlych katastrofických udalostí majú na svedomí, resp. sa na nich spolupodieľali aj dopady veľkých úlomkov asteroidov, rádovo nad 5 km. Keď si odborníci zostavili časovú škálu impaktov, štatisticky im vyšlo, že každých zhruba 65 až 100 Ma sa Zem zrazí s jedným telesom o veľkosti rádovo 10 km a väčším, každých 7 - 14 Ma dojde k impaktu telesa o veľkosti do 5 km, každý 1 Ma dopadne jeden asteroid veľkosti 1 - 2 km, každých 10 000 rokov sa zrazíme s telesom veľkým 250 m, jedno 60 m veľké teleso sa zrazí so Zemou každých 300 rokov a napokon každých 100 rokov možno očakávať impakt telesa o veľkosti 30 m. Menšie meteority samozrejme dopadajú na Zem každoročne a kozmický prach neustále.

Na základe štúdia veľkých aj menších masových vymieraní organizmov od permsko-triasovej udalosti vyplýva, že tieto katastrofické udalosti sa opakujú s periódou každých

približne 30 ± 5 Ma. Je zaujímavé, že aj geomagnetické cykly Zeme majú periódu cca 30 Ma a rovnako aj orogenetické (horotvorné) cykly sa opakujú s periodičnosťou 30 až 50 Ma. Navyše táto perióda časovo dobre zodpovedá polovici vertikálnej oscilácie Slnečnej sústavy okolo osi našej Galaxie (33 ± 3 Ma). Uvažuje sa, že tieto viac-menej pravidelné cykly môžu súvisieť s obehom našej Slnečnej sústavy tzv. Gouldovým pásmom v jednom zo špirálovitých ramien našej Galaxie (Mliečnej dráhy). Dochádza pritom ku gravitačnej interakcii Slnečnej sústavy a vyššej koncentrácii mladých hviezd v Gouldovom pásme, čoho dôsledkom môže byť väčšia frekvencia zrážok komét a asteroidov s planétami a mesiacmi Slnečnej sústavy, teda aj so Zemou. Uvažuje sa aj o súvislosti impaktov s veľkými galaktickými cyklami v perióde 230 Ma, čo zodpovedá jednomu obehu Slnka a planét našej sústavy okolo stredu našej Galaxie. Jednou z príčin zrážok našej Zeme s veľkými úlomkami asteroidov a jadrami komét teda môžu byť gravitačná interakcia Slnečnej sústavy a iných častí našej Galaxie.

Periodicita s hodnotou v intervale 25-40 Ma sa skutočne ukazuje v slede viacerých veľkých kenozoických až mezozoických impaktov: Popigaj a Chesapeake Bay (~36 Ma), Chicxulub, Kara a Boltyš (~66 Ma), Steen River ? (~91 Ma), Tookoonooka (~128 Ma), Pučež-Katunki (~167 Ma) a Rochecouart (~201 Ma). V prípade starších kráterov sa už táto perióda vytráca, čo však môže vyplývať z faktu, že staršie krátery sa ťažšie identifikujú aj datujú. Na druhej strane je uvedená viac-menej pravidelná periodicita narušaná prítomnsťou ďalších veľkých impaktných štruktúr (napr. Manicouagan, ~215 Ma; Morokweng; ~145 Ma, Mjølnir ~142 Ma; Carswell, ~115 Ma; Manson, ~74 Ma; Montagnais, ~51 Ma). Ukazuje sa teda, že ďalšou príčinou dopadu veľkých asteroidov na Zem môžu byť aj ďalšie gravitačné interakcie, snáď s príčinou v našej vlastnej Slnečnej sústave, napr. vzájomné pôsobenie Jupitera a iných veľkých planét na pásmo asteroidov medzi Marsom a Jupiterom, odkiaľ pochádza veľká časť meteoritov aj väčších fragmentov planétok (asteroidov). Na druhej strane obrovská gravitačná sila Jupitera pôsobí v mnohých prípadoch ako ochranný štít pred dopadmi kozmických telies na Zem, pričom ich sama zachytí (napr. pozorovaný **impakt kométy Shoemaker-Levy 9** do Jupitera v r. 1994).

Na otázku, či teda môžeme aj v budúcnosti očakávať impakty (aj väčších rozmerov) na Zem, teda môžeme dať istú, ale znepokojivú odpoveď: určite áno. Toto nebezpečenstvo pre život na našej planéte si však ľudstvo začalo naplno uvedomovať až od 80. - 90. rokov 20. storočia, najmä v dôsledku identifikácie početných impaktných štruktúr na Zemi, ako aj s rozvojom astronómie a techniky ďalekohľadov na Zemi a vo vesmíre. Bolo preukázané, že už dopad približne 60 až 100 m veľkého telesa môže zničiť miliónové mesto na rozlohe 2000

km^2, čo je približne veľkosť Prahy. Dokázala nám to spomenutá udalosť v sibírskej Tunguzke v r. 1908, keď bol na analogicky veľkej ploche úplne zničený les a to dokonca teleso (asteroid, kométa) ani nedopadlo na povrch, ale vybuchlo takmer 10 km v atmosfére, našťastie v prakticky neobývanej oblasti. Priamy dopad a následný výbuch na povrchu Zeme by nutne vyhĺbil kráter a účinky by boli ešte ničivejšie. Dopad ešte väčších telies by už bol naozaj katastrofický: cca 500 až 700 m veľké teleso by už bolo schopné zničiť územie štátu o veľkosti 80 - 100 tisíc km^2, pričom počet ľudských obetí by v husto obývanej krajine mohol dosiahnuť niekoľko miliónov. Na globálnu katastrofu, v dôsledku ktorej by mohla okamžite až v priebehu ďalších rokov zahynúť takmer alebo úplne celá ľudská populácia, stačí údajne dopad telesa o veľkosti nad 1,5 km, ktoré by v dôsledku impaktu vyhĺbilo kráter s priemerom okolo 20 km. Je to kráter približne veľkosti nemeckého Riesu a s podobnými dopadmi môžeme rátať v intervale menšom ako 20 Ma.

Zatiaľ sme mali ako ľudský druh relatívne šťastie. S výnimkou možného vymretia cloviskej civilizácie a druhu Homo floresiensis pred približne 12 000 rokmi, ako aj tunguzskej udalosti v r. 1908, sme boli priamymi svedkami zväčša iba relatívne neškodných dopadov malých telies – meteoritov bez masových obetí. Výnimkou môže byť meteorit, ktorý v roku 616 zabil v Číne 10 ľudí. Iný dážď malých meteoritov, údajne 3. februára 1490 zabil v provincii Šen-si niekoľko ľudí, podľa iného prameňa to však bolo až 10 tisíc obetí. V roku 1911 zabil meteorit v egyptskej Nakhle psa. Neskôr sa zistilo, že sa jedná o veľmi vzácny typ meteoritu z Marsu, nazvaný podľa lokality dopadu ako nakhlit. V r. 1950 zranil 3,9 kg ťažký meteorit o veľkosti asi 10 cm spiacu ženu v meste Sylacauga v Alabame (USA). V roku 1992 dopadol 12 kg ťažký meteorit do zaparkovaného auta v Peekskillu v štáte New York (USA). Unikátne poškodený automobil bol potom predaný v dražbe za oveľa vyššiu cenu, ako bola hodnota ojazdeného auta.

Najnovší prípad dopadu meteoritu, ktorý spôsobil početné zranenia ľudí a hmotné škody, je z 15. februára 2013, keď o 9:20 h ráno miestneho času došlo k rozsiahlej explózií, sprevádzajúcej rozpad meteoritu v širšej oblasti mesta Čeľjabinsk na Urale v Rusku. Odhaduje sa, že pôvodný meteorit mal veľkosť okolo 17 - 20 metrov a hmotnosť približne 12 až 13 tisíc ton. Meteorit padal s rýchlosťou okolo 18 km/s, vo výške 32 km nad povrchom však vybuchol a rozpadol sa na tisíce drobných úlomkov. Pritom bola uvoľnená energia $2{,}1 \cdot 10^{15}$ J (Joule), resp. 470 000 ton TNT, čo zodpovedá 20 - 30 hirošimským atómovým bombám. Tlaková vlna spôsobila rozsiahle škody, pričom poškodila okolo 4300 budov v 6 mestách, rozbila desaťtisíce okien na budovách a v Čeľjabinsku sa následkom tlakovej vlny zrútila strecha a časť múru miestnej továrne. Približne 1500 ľudí bolo zranených najmä

črepinami skla. Úlomky meteoritu vyhĺbili najmenej tri krátery, jeden s priemerom 8 m bol objavený na zamrznutom jazere Čebarkul, asi 70 km JZ od Čeľjabinska (***obr. 46***). V samotnom jazere boli najprv vylovené desiatky drobných fragmentov tohto telesa, zväčša len niekoľko mm veľkých, najväčší vylovený úlomok mal hmotnosť okolo 570 kg. Jedná sa o obyčajný chondrit, ktorý obsahuje cca 10 % Fe. Pravdepodobné väčšie úlomky meteoritu (až do 500 kg ťažké) však doteraz nenašli. Išlo o najväčšiu moderne zdokumentovanú explóziu vesmírneho telesa nad Zemou od výbuchu asteroidu (jadra kométy ?) v oblasti Tunguzky na Sibíri v roku 1908.

Obr. 46. *Kráter s priemerom 8 m po dopade meteoritu 15.2.2013 na zamrznutom jatere Čebarkul v Rusku (Zdroj: www.rt.com).*

Samozrejme štatisticky platí, že čím väčšie impaktujúce teleso, tým nižšia pravdepodobnosť dopadu. Nič však nemožno nechať na náhodu a preto v súčasnosti funguje veľký medzinárodný astronomický projekt zameraný na systematické vyhľadávanie a monitorovanie asteroidov v blízkosti obežnej dráhy Zeme s presnými výpočtami ich budúceho priblíženia či dokonca rizika možnej zrážky so Zemou. Vážnosť situácie dokladá, že Valné zhromaždenie OSN v r. 1999 prijalo tzv. Viedenskú deklaráciu, na základe ktorej musia byť podniknuté kroky na zlepšenie koordinácie štátov sveta pri identifikácii, pozorovaní a predvídaní možných kolízií s asteroidami. Napriek intenzívnemu pozorovaniu sa odhaduje, že v súčasnosti poznáme len okolo 10 % týchto potenciálne nebezpečných telies, ktoré sa môžu

ptibližovať k dráhe Zeme (NEA), alebo ju dokonca križovať (ECA). Najväčšie teleso zo skupiny NEA je **1036 Ganymedes** s veľkosťou 38 km, najväčší známy objekt ECA je **1866 Sizyfos**. Oba tieto veľké asteroidy však nepredstavujú bezprostrednú hrozbu. Zo známych a monitorovaných asteroidov sa zatiaľ ako najnebezpečnejší ukazuje 320 až 400 m veľké a 36-40 miliónov ton ťažké teleso **99942 Apofis** (po grécky Ničiteľ), ktoré bolo objavené len pomerne nedávno, v r. 2004 ***(obr. 47)***. Na základe presne vypočítaných

Obr. 47. *Asteroid 99942 Apofis. Hrozí zrážka so Zemou v blízkej budúcnosti ? (Zdroj: NASA).*

parametrov dráhy vyplýva, že už onedlho, presne v piatok 13. apríla 2036 sa Apofis priblíži k Zemi na vzdialenosť len cca 30 000 km (čo je len 1/10 vzdialenosti Zeme od Mesiaca), ba dokonca so štatistickou pravdepodobnosťou 1 : 250 000 by sa mohol zraziť so Zemou. Ďalšia málo pravdepodobná, ale možná zrážka s Apofisom nie je vylúčená pri jeho ďalších tesných priblíženiach k Zemi v rokoch 2048 a 2069. Podobné potenciálne nebezpečenstvo predstavuje asteroid **1999 RQ 36** s veľkosťou cca 500 m, ktorý sa tesne priblíži k Zemi v r. 2182, ako aj približne 1 km teleso **(29075) 1950 DA** s možnou kolíziou v r. 2880. Nebezpečenstvo predstavujú aj kométy, najmä jadrá už neaktívnych komét, ktoré sú pomerne malé a slabo viditeľné. Takýchto kometárnych objektov poznáme zatiaľ len niekoľko, ale môže ich byť až tisíce.

Čo môže ľudstvo proti tejto hrozbe robiť ? Okrem intenzívneho vyhľadávania, monitorovania a výpočtu dráh potenciálne nebezpečných asteroidov vznikajú aj ambiciózne plány na aktívne zabránenie ich prípadného dopadu na Zem. Tieto projekty by zahŕňali najmä odklonenie dráhy nebezpečného asteroidu na inú, bezpečnú dráhu, kde by nás určite minul. Pri menších telesách by stačilo pristátie nepilotovanej sondy a jemné odklonenie pomocou jej

raketových motorov, pri väčších telesách sa uvažuje napr. s iniciáciou explózie na povrchu asteroidu, ktrá by vychýlila jej dráhu. Určité riziko tohto plánu však spočíva v tom, že prípadné úlomky po výbuchu by mohli zasiahnuť Zem.

Ľudstvo teda čaká ešte veľa práce na poli výskumu a prevencie asteroidov – týchto poslov z vesmíru, ktorí nás počas histórie Zeme mnohokrát navštívili a svojim dopadom pretvárali, pretvárajú a budú pretvárať tvár našej planéty. Spôsobili obrovské katastrofy, ale s veľkou pradepodobnosťou priniesli aj vodu a organické molekuly – základné predpoklady na vznik a rozvoj života na našej planéte. Preto nám neostáva nič iné, ako ich intenzívne poznávať a naučiť sa s ich prítomnosťou žiť.

Doporučená a použitá literatúra

Bouška V. (1992): Tajemné vltavíny. Nakl. Gabriel, Praha, 86 p.

Bouška V. et al. (1987): Přírodní skla. Academia, Praha, 264 s.

Buffetaut E. (2005): Tak jako dinosauři. Hromadná vymíraní druhů a život na Zemi. Nakl. Dokořán a Argo, Praha, 200 s.

Frankel C. (1999): The end of Dinosaurs. Chicxulub crater and mass extinctions. Cambridge University Press, Cambridge, 223 s.

Houzar S. a Trnka M. (1994): Moravské vltavíny. Bull. NM, 2, 63-66.

Jiránek J. (2012): Země jako vesmírný terč. Minulost a budoucnost srážek Země s vesmírnými tělesy. Euromedia Group, k. s. - Knižní klub, Praha, 408 s.

Keller G. (2012): The Cretaceous-Tertiary mass extiction, Chicxulub impact, and Dekkan volcanism. In: Talent J. A. (ed.): Earth and Life, Int. Year of Planet Earth, 759-793.

Kráľ J. (2007): Vek Slnečnej sústavy. Veda, Bratislava, 248 p.

Norton O. R. (2002): The Cambridge encyclopedia of meteorites. Cambridge University Press, Cambridge, 354 s.

Trnka M. a Houzar S. (1991): Moravské vltavíny. Muzejní a vlastivědná společnost v Brně, Brno, 116 s.

Schulte P. et al. (2010): The Chicxulub asteroid impact and mass extinction at the Cretaceous-Paleogene boundary. Science, 327, 1214-1218.

Skála R. (1994): Klasifikace meteoritů. Bull. Mineral.-Petrol. Odd. Nár. Muz., 2, 28-37.

Skála R. (1994): Impaktové kráterování Země. Bull. Mineral.-Petrol. Odd. Nár. Muz., 2, 38-62.

White R. V. a Saunders A. D. (2005): Volcanism, impact and mass extinctions: incredible or credible coincidences? Lithos, 79, 299-316.

Monotématické čísla časopisov:

Elements (2012), ročník 8, číslo 1 („Impact!“, venovaný impaktom)

Minerál (2008), ročník 16, číslo 2 (venované prírodným sklám)

Minerál (2008), ročník 16, číslo 5 (venované meteoritom)

Internetové stránky: najmä Earth Impact Database (The Planetary and Space Centre, Univ. of New Bruswick, Fredericton, Canada): www.passc.net/ImpactDatabase/

Prof. RNDr. Pavel Uher, CSc.

KOZMOGÉNNA GEOLÓGIA

Vydané na CD

Korigoval autor

Vedúci katedry: prof. RNDr. Marián Putiš, DrSc.

Rozsah 88 strán, 4,40 AH, prvé vydanie

ISBN 978-80-223-3373-3