

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Zdeněk Pokorný

Nové poznatky o planetách

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 24 (1979), No. 1, 26--30,31--32

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/139443>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1979

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



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

Nové poznatky o planetách

Zdeněk Pokorný, Brno

Hlavním úkolem současného výzkumu planet je poznat procesy a okolnosti, které vedly ke vzniku naší sluneční soustavy. Chceme vědět, jak se v průběhu uplynulých 5 miliard let utvářely a měnily planety a jejich družice, proč se mnohá tato tělesa navzájem tak markantně liší a proč se naopak setkáváme s řadou procesů, které probíhaly téměř stejně v různých oblastech planetární soustavy. Je jasné, že výzkum planet, který se dnes stává komplexní vědní disciplínou, nám bude dávat na tyto otázky stále určitější a přesnější odpovědi.

1. Krátery na tělesech sluneční soustavy

Krátery nacházíme na všech planetách zemského typu i na jejich satelitech. Je možné, že krátery existují i na družicích planet Jupiterova typu a na planetkách, které jsou převážně v prostoru mezi drahami Marsu a Jupitera; zde však přímé důkazy chybějí. „Všudypřítomnost“ kráterů nám umožňuje získat řadu informací o raných fázích vývoje sluneční soustavy. Krátery jsou ve většině případů pozůstatkem po impaktech těles, k nimž docházelo v období před 4 miliardami let, tedy krátce po vzniku sluneční soustavy.

Stáří sluneční soustavy se odhaduje na $4,5 \cdot 10^9$ až $4,7 \cdot 10^9$ let. V té době se ukončil proces akumulace planet a družic z materiálu, který obsahovala původní tzv. sluneční mlhovina. Po vzniku planet však zbyla značná množství plynu spolu s nespočetnými pevnými tělesy, která při srážkách s planetami rozbíjela jejich povrchové vrstvy. Většina, ne-li všechny planety a jejich satelity začínaly svou existenci jako tělesa pokrytá krátery. V řadě případů (např. na Měsíci) byl povrch krátery zcela saturován – nové krátery překrývaly staré.

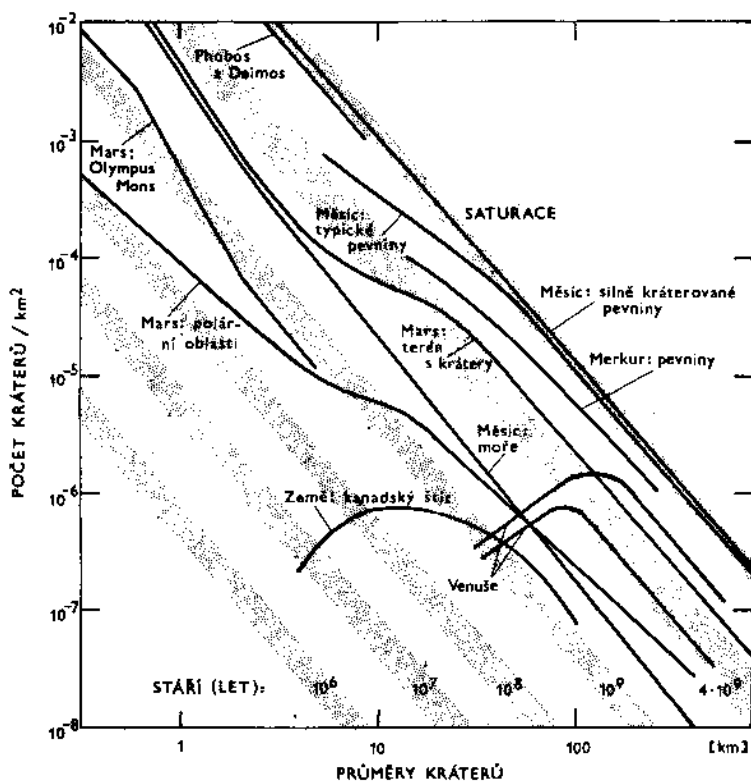
Období intenzivního bombardování skončilo před asi $4 \cdot 10^9$ lety, kdy byly zřejmě působením mohutného slunečního větru odstraněny ze sluneční soustavy téměř všechny zbytky pevných těles. K vyčištění sluneční soustavy pomohla i skutečnost, že „poločas doby života“ těchto zbytků (tj. doba nutná k tomu, aby planety ovlivnily jejich dráhy tak, aby polovina pevných těles se srazila s planetami) činil řádově jen 10^6 let. I dnes dochází k impaktům na planety – jsou však 10^2 až 10^3 krát méně časté než před 4 miliardami let.

Po období silného bombardování nezůstal povrch planet beze změn. I na takových tělesech, jako jsou Měsíc a Merkur (bez atmosféry, bez vody), dochází k zahlazování původních kráterů: překrývají je jiné krátery nebo materiál vyvržený při impaktu, případně proudy lávy. Původní charakter krajiny stírají geologické pochody jako vulkanismus, tektonická aktivita, silně se může projevit větrná nebo vodní eroze. O těchto erozivních procesech můžeme získat informace srovnáním počtu a velikosti kráterů

na jednotlivých tělesech sluneční soustavy. Pro primárně vzniklé krátery přibližně platí, že jejich počet n je nepřímo úměrný čtverci průměru d ($n \sim d^{-2}$). Z odchylek od této závislosti (platí-li např. $n \sim d^{-1}$) lze usuzovat na existenci erozivních procesů v určitých vývojových obdobích (obr. 1).

U malých Marsových družic *Phobos* a *Deimos* (jsou to nepravidelné bloky skal o rozměrech $27 \times 21,5 \times 19$ km a $15 \times 12 \times 11$ km) je hustota kráterů přibližně stejná jako na měsíčních pevninách. Povrch není dotčen erozí a je takřka saturován krátery; je tedy velmi starý (obr. 2)*). Mars na rozdíl od svých družic vykazuje zřetelné stopy geologické a jiné aktivity. Zatímco jedna jeho polokoule je hustě pokryta krátery, druhá obsahuje málo impaktních kráterů, zato však zde najdeme rozsáhlé plošiny s vulkanickými kužely, zlomy a propadliny v kůře planety tektonického původu a údolí zajímavých sinusovitých tvarů – možná vyschlá koryta řek (obr. 3). V polárních oblastech pozorujeme zvláštní vrstevnaté terény, vzniklé usazováním materiálu po dlouhá geologická období.

Studium kráterů je klíčem k pochopení procesů eroze. Příkladem může být závislost mezi n a d pro Marsův terén s krátery (obr. 1): atmosféra planety, byť řídká, je schopná zvednout prach z povrchových vrstev a přenášet jej. Usazováním tohoto prachu se



Obr. 1. Počet a velikosti kráterů na jednotlivých tělesech sluneční soustavy. Tečkované pásy jsou izochrony, udávající počet primárně vzniklých impaktních kráterů v dané době. Šířka izochron naznačuje, že zatím neznáme jejich přesnou polohu. Čára s popisem „SATURACE“ udává spektrum velikostí kráterů pro tělesa zcela zaplněná krátery.

*) Obrázky 2.—5. jsou otištěny na příloze za str. 30.

trvale zanášejí krátery, zvláště ty menší. Výsledkem je odklon od závislosti $n \sim d^{-2}$. Ustane-li zanášení kráterů prachem, povrch se znovu začne zaplňovat malými krátery a v oblasti malých průměrů d znovu platí vztah $n \sim d^{-2}$. U Marsu se zachovaly jen velké staré krátery (vzniklé před $4 \cdot 10^9$ let). Krátery menší než 4 km mají díky erozi krátkou dobu života; většina z nich je pravděpodobně mladších než $3 \cdot 10^9$ let. Na polocevní s málo krátery došlo k mohutným výlevům lávy při vulkanických pochodech. V té době (před asi $(1-2) \cdot 10^9$ let) možná proudila voda v některých Marsových údolích. Před $10^8 - 10^9$ lety vyvrcholilo období silné vulkanické aktivity, při němž vznikly gigantické štítové sopky jako Olympus Mons. Po období vulkanické aktivity většina erozivních procesů vymizela, jen marsovské větry pokračovaly v přenosu a usazování prachu. Sedimenty v polárních oblastech jsou jedněmi z nejmladších geologických celků na Marsu; jsou staré snad jen 10^8 let.

U *Země* díky silné erozi vymizely krátery za geologicky krátkou dobu. Zachovaly se jen zbytky kráterů starých asi $1 \cdot 10^9$ let (což je třetina stáří měsíčních moří), např. v oblasti kanadského štítu u Hudsonova zálivu.

Také u *Venuše* pozorujeme zřetelné stopy eroze. Sledování pevného povrchu je však ztíženo hustou atmosférou, takže s výjimkou dvou panoramatických záběrů z přistávacích modulů sond Veněra 9 a 10 (obr. 4) máme možnost studovat reliéf povrchu planety zatím jen nepřímou – radiolokační technikou. Velké krátery (o průměrech nad 100 km) jsou četné jako ve starých kráterových polích na Marsu, malé (pod 100 km v průměru) jsou však silně vyhlazeny, zřejmě díky erozi (obr. 1). Krátery jsou mělké, asi jsou částečně vyplněny prachem. Povrch Venuše pravděpodobně není tak starý jako měsíční ani tak geologicky aktivní jako zemský. Formoval se před $(1-2) \cdot 10^9$ lety. Snímky povrchu ze sond Veněra 9 a 10 ukazují ostré a hranaté kameny v jednom z míst přistání a zaoblené, vyhlazené balvany ve druhém; z toho plyne, že se povrch přetvářel a erodoval v geologicky nedávné minulosti.

Povrch *Merkura* je na první pohled zcela stejný jako měsíční. Přesto však existují rozdíly: na Merkuru pozorujeme několik kilometrů široké rýhy, které se táhnou po povrchu v délce sta kilometrů, často napříč velkými krátery. Naznačují, že se kůra planety smrštila na obvodu asi o 2 km. Na Merkurově povrchu je též mírný nedostatek malých kráterů ve srovnání s měsíčním povrchem. Tuto skutečnost lze si vysvětlit např. tím, že povrch planety byl plastický ještě na konci období silného bombardování – před asi $4.1 \cdot 10^9$ lety. Pak se ovšem malé krátery z raného období nezachovaly.

Zdá se, že existuje základní pravidlo: čím je planeta hmotnější, tím více energie generuje z vnitřku a tím déle se uchovávají procesy jako vulkanismus a tektonická aktivita. Menší tělesa, např. Merkur a Měsíc, chladla rychle a na nich vulkanismus brzy vyhasl. Na větších planetách vnitřní zdroje tepla zůstaly důležitým faktorem. Vulkanismus, tektonická aktivita a atmosférická eroze částečně zničily původní, krátery pokryté povrch Venuše a Marsu a v případě *Země* jej přetvořily téměř úplně.

2. Planetární atmosféry

Atmosférické obaly, které dnes pozorujeme u sedmi z devíti planet, jsou dosti rozdílné jak co do chemického složení, tak i své stavby. Tyto rozdíly jsou výsledkem dlouhodobého vývoje. Původní atmosféry, které obklopovaly planety v době jejich vzniku z protoplanetárního oblaku, se skládaly z prvků, které převažovaly ve sluneční mlhovině – z vodíku, hélia a možná některých inertních plynů. Ostatní sloučeniny jako H_2O , CO_2 , NH_3 aj. byly v pevné fázi. Atmosféry velkých planet (Jupitera až Neptuna) jsou v podstatě těmito původními atmosférami.

Planety zemského typu, nacházející se ve vnitřních částech sluneční soustavy, ztratily primární atmosféry v době, kdy silný sluneční vítr vytlačoval zbytky původní sluneční mlhoviny. Začínající rozpad radioaktivních prvků, chemická a mechanická diferenciace látky uvnitř planet se pak staly hlavním zdrojem tepla. Z vylévající se lávy se uvolňovaly vodní pára, CO_2 , NH_3 , NH_4Cl , sloučeniny síry a další plyny, které tak vytvořily druhotnou atmosféru.

Další vývoj atmosfér planet závisí na řadě okolností. Nejlehčí plyny (vodík, hélium) unikají do meziplanetárního prostoru, neaktivnější reagují s povrchovými horninami. V horních vrstvách atmosfér nastává fotodisociace molekul vlivem ultrafialového slunečního záření, při níž vznikají atomární vodík, kyslík a dusík. Na Zemi bylo složení atmosféry ovlivněno vznikem života.

Tabulka 1. Planetární atmosféry

Planeta	Tlak na pevném povrchu [Pa]	Průměrná teplota na povrchu [K]	Chemické složení		Poměrná molekulová hmotnost atmosféry	Průměrný teplotní gradient v troposféře [K km ⁻¹]
			Hlavní složky atmosféry ¹⁾	Stopově zastoupené sloučeniny a prvky ²⁾		
Venuše	$9,3 \cdot 10^6$	740	CO_2 (93—100); Ar + N_2 (0—7) ³⁾	H_2O ; CO; He; H_2SO_4 ; HCl; O_2 ; HF	43,4	7,4
Země	$9,8 \cdot 10^4$	288	N_2 (78,1); O_2 (20,9); Ar (0,9)	H_2O ; CO_2 ; Ne; He; CH_4 ; Kr; SO_2	29,0	6,5
Mars	$(6—7) \cdot 10^2$	210	CO_2 (96); N_2 (2,5); Ar (1,5)	O_2 ; CO; H_2O ; O_3 ; Kr; Xe	43,4	3,7
Jupiter	—	130	H_2 (80—90); He (20—10)	CH_4 ; NH_3 ; C_2H_6 ; PH_3 ; CH_3D ; H_2O ; C_2H_2 ; HCN; GeH_4 ; CO	2,2	2
Saturn	—	100	H_2 ; He ³⁾	CH_4 ; NH_3 ; PH_3 ; C_2H_6	2,2	?
Uran	—	60?	H_2 ; He ³⁾ ; CH_4	NH_3 ³⁾	2,2	?
Neptun	—	45?	H_2 ; He ³⁾ ; CH_4	NH_3 ³⁾	2,2	?

¹⁾ V závorkách jsou uvedena procenta počtu molekul.

²⁾ Pořadí respektuje relativní zastoupení (postupně klesá).

³⁾ Předpokládaná existence na základě teoretických modelů.

Základní parametry dnešních planetárních atmosfér jsou uvedeny v tab. 1. V tabulce chybí jen planeta Merkur, jejíž atmosféra je mizivě řídká (tlak při povrchu $< 2 \cdot 10^{-7}$ Pa), a Pluto, o jehož atmosféře nemáme žádné přímé důkazy. U planet Jupiterova typu vztahujeme většinu údajů k tlakové hladině $\approx 0,1$ MPa, v níž se přibližně nacházejí pozorované atmosférické útvary. O atmosférách zde však hovoříme jen konvenčně, neboť tyto planety nemají pevný povrch.

Zajímavý je markantní rozdíl v chemickém složení atmosfér Země a Venuše (popř. Marsu). Neznamená však, že by množství CO_2 uvolněné z povrchových vrstev jednotlivých planet bylo tak rozdílné; naopak, u Venuše a Země bylo přibližně stejné – asi $5 \cdot 10^{20}$ kg. U Venuše však téměř celé množství CO_2 zůstalo v atmosféře, zatímco u Země 3/5 nebo i více CO_2 se postupně vázalo v zemské kůře ve formě vápencových hornin. Pokud i na Venuši došlo ke vzniku uhličitánů, pak se znovu přeměnily v CO_2 díky velmi vysoké povrchové teplotě (> 700 K).

Proč se u povrchu Venuše udržuje tak vysoká teplota, není dnes zcela přesně známo. Nejpravděpodobnější vysvětlení je pomocí tzv. *skleníkového efektu*: je-li atmosféra dostatečně propustná pro viditelné a blízké infračervené záření ($\lesssim 3 \mu\text{m}$) a naopak špatně propouští infračervené záření $\lambda > 4 \mu\text{m}$ (tj. λ_{max} pro záření černého tělesa $T \leq 700$ K), akumuluje se tepelná energie ve spodních vrstvách atmosféry. Vysokou tepelnou opacitu (neprůhlednost) způsobují hlavně tříatomové molekuly (zde CO_2 , ale i molekuly stopových příměsí). Doposud nevíme, zda skleníkový efekt je jediným mechanismem udržujícím vysokou teplotu při povrchu, neboť neznáme přesně průběh absorpce slunečního světelného toku v různých výškách v atmosféře ani přesné chemické složení atmosféry.

Relativně hmotná Venušina atmosféra ($5 \cdot 10^{20}$ kg; pro srovnání Země $5 \cdot 10^{18}$ kg, Mars $2 \cdot 10^{16}$ kg) je při povrchu téměř v klidu – horizontální složka rychlosti větru činí maximálně 2 m s^{-1} . Také variace povrchové teploty (den/noc, rovník/pól) jsou malé (max. 20 K). Ve výškách 40–50 km však dochází k prudkému proudění v atmosféře a celá horní oblačná vrstva rotuje rychlostí 70–130 m s^{-1} . Odpovídá to zhruba 4denní rotaci (zpětně), která se ostře odlišuje od 243,0denní rotační periody vlastní planety. Mechanismus této rychlé zonální cirkulace horní atmosféry zatím neznáme.

Marsova atmosféra na rozdíl od jiných planetárních atmosfér má díky své nevelké hmotnosti i malou tepelnou setrvačnost. Denní změny teploty na rovníčce 20° dosahují 70–80 K, sezónní (léto/zima) na rovníku ≈ 60 K, změny rovník/pól 40–50 K. I nevelké změny v insolaci způsobují teplotní výkyvy, které stačí k tomu, aby se uvedly do pohybu rozsáhlé části Marsovy atmosféry. Rychlost proudění atmosférických hmot, obvykle nepřesahující 40–50 m s^{-1} , může však být 2 až 3krát vyšší v místech, kde povrchové útvary o rozměrech řádově 100 km urychlují proudění. Tyto prudké větry přemísťují prach ve velkých měřítkách a dávají vznik prachovým bouřím.

Největší prachové bouře vznikají v obdobích, kdy je planeta poblíž přísluní a dostává nejvíce sluneční energie. V oblasti Hellespontus se díky příhodnému tvaru terénu zesilují místní větry, které při narušení tepelné stability přerůstají v globální prachové bouře. Do atmosféry Marsu jsou vynášeny částice, skládající se asi z 60 % z SiO_2 , jejichž rozměry jsou řádově 1–10 μm . Po dobu několika týdnů až měsíců (podle mohutnosti

prachové bouře) je celá planeta zahalena do prachového obalu. Částice se dostávají i 40–50 km vysoko nad povrch.

Cirkulace v atmosféře Jupitera má výrazný zonální charakter. Horní části atmosférických vrstev tvoří systém tmavých a světlých mračen, která jsou rychlou rotací ($\approx 10^h$) uspořádána do pásů rovnoběžných s rovníkem (obr. 5). Základním problémem při hledání mechanismu celkové cirkulace atmosféry je otázka přenosu tepelné energie v atmosféře. Z pozemských pozorování i na základě měření kosmických sond Pioneer 10 a 11 vyplývá, že Jupiter vyzařuje 2 až 2,5krát více energie než získává od Slunce (vlastní tok zářivé energie od Jupitera činí $5,5-7,0 \text{ W m}^{-2}$). Emitovaný tepelný tok je však přibližně stejný jak v rovníkových, tak i v polárních oblastech, ačkoliv dopadající sluneční tok je maximální na rovníku a téměř nulový u pólů. Znamená to, že existuje konvektivní cirkulace, která přenáší teplo z nitra Jupitera směrem k povrchu mnohem více v chladných polárních oblastech než v rovníkových.

3. Stavba velkých planet

Velké planety se planetám zemského typu podobají jen velmi málo. Především je zcela rozdílná jejich stavba a chemické složení, což vyplývá z rozdílné historie vzniku obou skupin planet. Podle teorie vzniku planet ze sluneční mlhoviny vznikly velké planety buď přímo – v důsledku gravitační nestability části mlhoviny, nebo tak, že nejdříve vznikla malá pevná železnatokamenná jádra, na něž se gravitací postupně vázaly tlusté atmosférické vrstvy z vodíku a hélia.

Na konci této protoplanetární fáze vývoje došlo k rychlému kolapsu, který měl za následek, že se prudce zvýšila teplota uvnitř vznikající planety. Svítivost Jupitera převýšila o čtyři až pět řádů dnešní výdej energie a činila 10^{-4} až 10^{-2} svítivosti Slunce (tj. 10^{22} až 10^{24} W). Období vysoké svítivosti, kdy Jupiter zářil jako červená hvězda, však bylo velice krátké, netrvalo snad ani jeden rok. Potom v průběhu následujících $4,5 \cdot 10^9$ let se Jupiter pomalu smršťoval z původně 4 až 5násobného průměru, který měl na konci své vysoce svítivé fáze, až na současný rozměr. Pomalá kontrakce ($\approx 1 \text{ mm/rok}$) zřejmě pokračuje i dnes a je příčinou pozorovaného tepelného excessu. Proces kolapsu byl stejný jako při vzniku hvězd, jen s tím rozdílem, že tělesa o hmotnostech menších než asi 0,07 hmotnosti Slunce nikdy nezapálí jaderné reakce, ale pokračují ve smršťování a chladnou.

Poměr vodíku a hélia – hlavních složek velkých planet – je zhruba stejný jako u Slunce (9 : 1 podle počtu atomů). Více než 50 % objemu těchto planet je vyplněno vodíkem a héliem v metalické fázi. Vodík přechází z fáze molekulární do metalické za teplot očekávaných v nitrech velkých planet ($\leq 10^4 \text{ K}$) za tlaku $3 \cdot 10^5 \text{ MPa}$. U Jupitera je tento fázový přechod ve vzdálenosti 0,75–0,80 poloměru planety od jejího středu. Existence rozsáhlého jádra vyplněného tekutým metalickým vodíkem vysvětluje přítomnost relativně silného magnetického pole Jupitera (indukce magnetického pole u viditelného povrchu činí 1,4 mT, tj. o řád více než na Zemi) a magnetosféry gigantických rozměrů (hranice magnetosféry ve směru ke Slunci je vzdálena $7 \cdot 10^6 \text{ km}$, ve směru od Slunce možná až u dráhy Saturna). Konvektivní proudy v elektricky vodivém

metalickém jádru generují magnetické pole planety pomocí tzv. *dynamového mechanismu*. Konvektivní cirkulace však nemůže probíhat celým Jupiterem, neboť na hranici fázevého přechodu mezi molekulárním a metalickým vodíkem se skokem mění hustota snad až o 25 %. Konvekce v nitru planety probíhá tedy odděleně v oblasti metalického a molekulárního vodíku.

Studium velkých planet je v současnosti důležitým zdrojem informací o vzniku a vývoji celé sluneční soustavy, neboť tato tělesa jsou vlastně „dobře zachovanými vzorky“ z raných fází vývoje slunečního systému. Uvážíme-li, že jde o tělesa s mnoha unikátními vlastnostmi, je zcela pochopitelný zvýšený zájem o vzdálené planety sluneční soustavy.

Literatura

Vzhledem k rozsáhlé literatuře z daného oboru uvádíme jen některé shrnující práce z posledního období.

Ke kap. 1:

CAMERON, A. G. W.: *Scientific American* 233 (1975), č. 3. 33.

HARTMANN, W. K.: *Scientific American* 236 (1977), č. 1, 84.

MUTCH, T. A., SAUNDERS, R. S.: *Space Science Reviews* 19 (1976), 3.

Ke kap. 2:

HUNT, G. E., McDONOUGH, T. R.: *Icarus* 27 (1976), 171.

HUNTEN, D. M., MCGILL, G. E., NAGY, A. F.: *Space Science Reviews* 20 (1977), 265.

KUZMIN, A. D., MAROV, M. JA.: *Fizika planety Veněra*. Moskva: Nauka 1974.

LEOVY, C. B.: *Scientific American* 236 (1977), č. 7, 34.

MAROV, M. JA., MOROZ, V. I.: *Kosmičeskije issledovanija* 14 (1976), 651.

MOROZ, V. I.: *Space Science Reviews* 19 (1976), 763.

Ke kap. 3:

BODENHEIMER, P.: *Icarus* 29 (1976), 165.

HUBBARD, W. B., SMOLUCHOWSKI, R.: *Space Science Reviews* 14 (1973), 599.

ŽARKOV, V. N., TRUBICYN, V. P., SAMSONĚNKO, L. V.: *Fizika Zemli i planet. Figury i vnutreněje strojenije*. Moskva: Nauka 1971.

Jupiter. Sborník (vyd. T. GEHRELS). Tucson: The University of Arizona Press 1976.

V knize *Why the professor can't teach* se M. Kline zabývá výhradně situací na školách v USA. V první kapitole je interpretem autorových myšlenek stylizovaná postava Petra Landerse, čerstvého absolventa univerzity, který začíná sám vyučovat v college. S ironizující naivitou popisuje epizody ze školního prostředí.

Petr rekapituluje své dosavadní matematické vzdělání:

Výuka v základní škole byla přijatelná. Každý žák musel přece jen vědět, kolik má platit za pět lízáték, když znal cenu jednoho. Pravda, některé operace zůstaly záhadné. Nebylo jasné, proč se dělení dvou zlomků má provádět jako násobení převráceným dělitelem, ale zdálo se, že učitel ví,

co je správné. Stále se odvolával na pravidla, principy a zákony. Pravidla, stejně jako pravidla chování, se zřejmě uplaňují i v aritmetice. Principy, jak Petr věděl, byly stanoveny principály [řediteli] škol, a ti samozřejmě byli autoritami. Pokud jde o zákony, každý věděl, že existují městské, státní a federální zákony a dokonce i zákony desatera. A zákony se samozřejmě musejí poslouchat.