

# Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

---

B. Ju. Levin

Vznik a stavba Země

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 3 (1958), No. 3, 303--311

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/137121>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1958

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>

## GEOFYSIKA

### VZNIK A STAVBA ZEMĚ<sup>1)</sup>

B. JU. LEVIN

Více než 99% látky Země je nepřístupno bezprostřednímu výzkumu. Proto se všechny práce, věnované celkovému chemickému složení Země (P. N. Čirvinskij [1], Clarke [2], Link [3], Washington [4], Niggli [5], I. I. Zaslavskij [6, 7], A. J. Fersman [8]), opírají jak o údaje geofyzikální a geochemické, tak i o údaje kosmogonické, při čemž používají přímo nebo nepřímo představ o vzniku, vývoji a vnitřní stavbě Země. Při těchto výzkumech se také hojně využívá údajů o chemickém složení meteoritů, což však vždy není podloženo vzájemně si neodporujícími hypotézami o vzniku Země a meteoritů [9].

1. Současné kosmogonické výzkumy různých autorů se obírají vznikem planet z chladného plyno-prachového oblaku. Avšak i když vycházejí ze stejného prvopočátečního stavu planetární látky, přesto se značně vzájemně liší v předpokladech o procesu formování planet.

V letech 1943—1944 se téměř současně objevily hypotézy Weizsäckerova va a Šmidtova, které předpokládají postupný růst Země „vyčerpáním“ okolní rozptýlené látky. V dalších výzkumech O. Ju. Šmidta a jeho spolupracovníků byla základní myšlenka o postupném růstu Země zpřesněna a dále rozvíjena [10]. Formování Země akumulací látky předpokládali později Edgevorth [11], Hoyle [12], Gold [13] a rovněž Urey. Kuiper ve svých výzkumech vzniku sluneční soustavy, které začal kolem r. 1949, vyšetřoval vznik Země a ostatních planet jako postupnou dissipaci masivních protoplanet. V posledních letech se však tento Kuiperův názor začal měnit a nyní se Kuiper již domnívá, že Merkur a Mars, a možná i Venuše a Země, vznikly postupným růstem [14]. Kuiper v podstatě posuzuje astronomickou stránku problému a zdržuje se podrobné analýzy údajů a otázky termické minulosti Země. Urey ve svých výzkumech, které se především opírají o chemické údaje, vzal zprvu jako astronomický základ hypotézu Kuiperovu, avšak později se toho musel zříci. Jen část chemických údajů lze vysvětlit vytvářením Země z masivní protoplanety. Analýza celého jejich souhrnu však ukazuje, že podobné protoplanety vůbec neexistovaly a že formování Země začalo akumulací chladných pevných částic [15, 16]. Kromě toho, jak ukázal I. S. Šklovskij [17], dissipace, při které se vodík (i helium) rozptýluje, avšak ostatní plyny zůstávají, musí probíhat velmi pomalu a vyžaduje mnohem více času. Nicméně

<sup>1)</sup> Б. Ю. Левин, *Происхождение и состав Земли*, Изв. АН СССР, с. геофиз., ч. 11, 1957, стр. 1323—1331.

Referát, předložený jménem akademika O. Ju. Šmidta a B. Ju. Levina na XI. Generálním shromáždění Mezinárodní unie geodetické a geofyzikální (Toronto, září 1957).

V. G. Fesenkov, který v r. 1951 přijal hypotézu o vzniku planet z plynochového oblaku, přidržuje se dodnes názorů, analogických dřívějším názorům, a domnívá se, že Země se vytvářela jak roztavené těleso [18].

2. Složení Země se v tomto článku probírá tak, že vycházíme z kosmogonické teorie, která je propracována na základě ideí, předložených O. Ju. Šmidtem. V krátké zprávě nelze ani vyložit historii rozvoje této teorie, ani provést velmi podrobnou analýsu faktických znalostí, což je nezbytné k tomu, abychom zdůvodnili, proč se předpokládá daná a ne jakákoli jiná cesta formování Země. Poznamenáváme, že analýsa základních zákonitostí pohybu planet vede k závěru, že planety vznikly z roje těles, která se pohybovala po rozličných drahách, avšak analýsa zákonitosti chemického složení planet umožňuje posunout se poněkud dále do minulosti a zjistit, že ještě ranějším stavem planetární látky byl plynochový oblak, obklopující Slunce.

O. Ju. Šmidt navrhl hypotézu, že oblak byl zachycen Sluncem. Tato hypotéza, které se později přidržoval také Edgeworth, umožňuje vysvětlit rozdělení momentu hybnosti mezi Sluncem a planetami. Jiní badatelé (Weizsäcker, Kuiper, Fesenkov) předpokládají, že protoplanetární oblak vznikl při procesu vytváření samého Slunce, avšak tento proces nekonkrétisuje, tj. problém momentů neřeší, nýbrž pouze odsunuje.

Z počátku, zvláště byl-li oblak zachycen, existovaly v něm pravděpodobně intenzivní turbulentní pohyby. Jak však ukázal V. S. Safronov a J. L. Ruskol [19], musely se rychle utlumit, poněvadž chyběl zdroj energie k jejich udržování. Proto, zkoumáme-li další evoluci oblaku, lze se domnívat (nezávisle na názoru na jeho vznik), že na počátku se nacházel ve stavu klidné laminární rotace kolem Slunce.

Plynová komponenta oblaku následkem větších tepelných rychlostí molekul byla rozložena v mírně zploštělém sféroidálním objemu. Na rozdíl od toho pevná prachová zrnka, jejichž chaotické rychlosti byly tlumeny třením o plyn a rovněž vzájemnými srážkami, musela klesat k centrální rovině oblaku a vytvářet tak tenký disk o zvýšené hustotě látky. V jisté etapě zplošťování dosáhla hustota v disku kritické hustoty Rocheovy; nastoupila gravitační labilita a disk se rozpadl na množství shluků, ve kterých byly vnitřní gravitační síly větší, než slapové síly Slunce. V různých vzdálenostech od Slunce byly hmoty shluků odlišné, všude však mnohem menší, než hmoty dnešních planet (L. E. Guřevič a A. I. Lebedinskij [29]).

Původně totiž vznikly prachové shluky, které se pak proměnily v tělesa o průměrech desítek a stovek kilometrů. Vnikání takových těles asteroidního typu „slepováním“ nevelkých částic zdá se méně pravděpodobným, poněvadž je možné jenom za určitých fyzikálně-chemických podmínek. Po vytvoření těles dostatečných rozměrů však možnost jejich dalšího růstu vyčerpáváním obklopující rozptýlené látky nevzbuzuje pochyb. Zprvu tělesa asteroidních rozměrů „vyčerpávala“ zbytky „prvotních“ částic, ale potom — v podstatě úlomky, které vznikaly jako výsledek rozdrobování některých asteroidních těles při srážkách. Ta nečetná tělesa, která předstihla ostatní v procesu růstu, se konečně přeměnila v nynější planety. V posledních etapách dokonce i dopadání samých asteroidních těles na jejich povrch nehrozilo již rozdrobováním a zkázou, nýbrž bylo součástí procesu růstu.

Vzájemné gravitační působení asteroidních těles, které se postupně zesilovalo se zvětšováním jejich hmot, proměnilo původně kruhové komplanární dráhy těchto těles v dráhy eliptické o různých sklonech. Při spojení mnohých

těles v planety došlo však k vyhlazení individuálních vlastností drah, a proto jsou dráhy planet téměř kruhové a téměř komplanární.

Jak ukázal O. Ju. Šmidt [21], proces růstu vyčerpáváním obklopující látky zahrnuje mechanismus, regulující vzdálenost mezi drahami sousedních rostoucích těles a vedoucí konečně k zákonitosti vzdálenosti planet od Slunce. Současné použití zákona zachování energie a momentu hybnosti na proces spojování původních částic v planety vysvětluje přímou rotaci planet [22]. Takovým způsobem vyšetřovaný proces formování planetární soustavy vysvětluje její základní astronomické vlastnosti. Rovněž objasňuje hmoty a chemické vlastnosti planet.

3. Vytváření prachového disku bylo provázeno vznikem zonálních rozdílů v chemickém složení a celkové hmotě pevných částic [20]. Pokud byla prachová zrnka smíchána s plynem a tedy rozložena v poměrně větším objemu, byl prostor kolem Slunce dostatečně průzračný, teplota prachových zrn byla poměrně velká a proto zrnka sestávala v podstatě z nesnadno tavných, netěkavých látek. S velikostí usazování prachových zrn stával se vznikající disk stále méně průzračným a teplota jeho vnějších částí klesala. Pouze úzká vnitřní část disku byla jako dříve prohřívána Sluncem a složení prachových zrn zůstávalo zde nezměněno. V ostatních částech v důsledku snížení teploty začaly na prachová zrna ve velkém množství „namrzat“ molekuly různých tekavých sloučenin přítomných v plynové části oblaku. Z údajů o velkém kosmickém množství prvků plyne, že kromě  $H_2$  v největším množství musely existovat  $H_2O$ ,  $NH_3$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$ . Jak se zdá, je třeba počítat s množstvím „namrzání“ nejen stabilních molekul, nýbrž i radikálů [23, 24].

Když se pak látka prachového disku po ukončení stadia roje těles asteroidních rozměrů, zkoncentrovala v planety, přeměnily se tyto zonální rozdíly v množství a složení pevných částic v zonální rozdíly ve hmotách a složení planet. Z těžko tavných, kamenných částic vnitřní zony disku vznikly nevelké, pevné planety zemské skupiny, a z částic vnější zony, obmrzlých tekavými látkami, vznikly planety — obři o malé hustotě. Zanedbáme-li změny teploty během procesu, lze říci v prvním přiblížení, že složení planet (a rovněž komet, asteroid a měsíců) je určeno teplotními podmínkami, které převládaly v tom místě a v té době, kdy planety vznikly. Je chybné se domnívat, že Jupiter obsahuje mnoho lehkých prvků proto, že je velký a zabránil jejich dissipaci. Naopak, Jupiter je proto tak velký, že vznikl za podmínek, kdy velmi četné lehké prvky mohly vstoupit do jeho složení.

Nejúplnějším chemickým údajem máme pro Zemi (a rovněž pro meteority) a jejich analýza potvrzuje výše popsany proces vzniku planet (B. Ju. Levin [9; 25—27], Urey [15—17; 28—31]). Pravda, důležitá je při tom otázka o podstatě hmotného jádra Země. Považujeme-li je za složené z látky, která přešla za účinku vysokého tlaku do metalického stavu (V. N. Lodočnikov [32], Ramsey [33, 34]), pak analýza hustot planet zemské skupiny a Měsíce ukazuje, že všechny mají stejné složení kromě Merkura, který je nejbližší ke Slunci (Ramsey [33], S. V. Kozlovskaja [35]). Tak tomu také muselo být při jejich akumulaci z pevných částic nacházejících se v prohřáté části disku.<sup>2)</sup>

Přidržíme-li se dřívější hypotézy o železném jádru Země, jak to činí Urey, pak různost hustot zemských planet je třeba přisuzovat rozličnému

<sup>2)</sup> Větší hustota Merkurova se vysvětluje jeho vznikem z nejvíce prohřátých, a proto také nejvíce hutných částic nebo možná též z částic, které zkonduovaly při vyšších teplotách.

Tabulka 1

Atom. číslo	Prvek	Kamenná část	Metalická část	Země jako celek	Zemská kůra	Kůra/Země
1	2	3	4	5	6	7
3	Li	$2,7 \cdot 10^{-4}$		$2,5 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$	10
4	Be	$1 \cdot 10^{-4}$		$1 \cdot 10^{-4}$	$4,2 \cdot 10^{-4}$	5
5	B	$2,5 \cdot 10^{-4}$		$2,3 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	6
6	C	0,034	0,10	0,04	0,023	0,6
7	N	0	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	0,01	100
8	O	40,5		37,3	47,2	1,3
9	F	$2,8 \cdot 10^{-3}$		$2,6 \cdot 10^{-3}$	0,066	25
11	Na	0,67		0,62	2,50	4
12	Mg	16,3	0,032	15,0	1,70	0,1
13	Al	1,69	0,004	1,6	8,08	5
14	Si	20,8	0,004	19,1	29,0	1,5
15	P	0,16	0,20	0,16	0,09	0,6
16	S	2,22	0,50	2,1	0,09	0,04
17	Cl	0,05		0,05	0,02	0,4
19	K	0,085		0,08	2,50	30
20	Ca	1,81	0,05	1,7	3,30	2
21	Sc	$6 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	2
22	Ti	0,08	0,01	0,07	0,44	6
23	V	0,007	$6,5 \cdot 10^{-4}$	0,007	0,009	1,4
24	Cr	0,29	0,03	0,27	0,012	0,04
25	Mn	0,23	0,031	0,21	0,09	0,4
26	Fe	15,1	88,8	21,0	4,63	0,2
27	Co	$(6 \cdot 10^{-4})$	0,65	0,05	0,0018	0,03
28	Ni	$(6 \cdot 10^{-3})$	9,46	0,8	0,01	0,01
29	Cu	$(1,6 \cdot 10^{-4})$	0,03	$3 \cdot 10^{-3}$	0,007	3
30	Zn	$(10^{-3})$	0,014	0,002	0,004	2
31	Ga	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$	0,0015	4
32	Ge	$9 \cdot 10^{-4}$	0,02	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$	0,1
33	As	$(3 \cdot 10^{-5})$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	2
34	Se	0,0013	$4 \cdot 10^{-4}$	0,001	$(10^{-6})$	$10^{-3}$
35	Br	$6 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	0,3
37	Rb	$5,5 \cdot 10^{-4}$	0	$5 \cdot 10^{-4}$	0,03	60
38	Sr	$2 \cdot 10^{-3}$		$2 \cdot 10^{-3}$	0,035	20
39	Y	$7 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-4}$	0,002	3
40	Zr	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$	0,02	6
41	Nb	$5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	0,001	20
42	Mo	$6 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	1
44	Ru	0	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$(10^{-9})$	$10^{-4}$
45	Rh	0	$5 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-7}$	0,0025
46	Pd	0	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-7}$	0,007
47	Ag	0	$4,2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$(2 \cdot 10^{-5})$	0,6
48	Cd	$(1 \cdot 10^{-3})$	$8,3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	0,01
49	In	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	0,5
50	Sn	$1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	2
51	Sb	$1 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	1
52	Te	$1 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$(10^{-7})$	0,01
53	J	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$	0,25
55	Cs	$1 \cdot 10^{-6}$		$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-4}$	100
56	Ba	$8 \cdot 10^{-4}$		$7 \cdot 10^{-4}$	0,06	80
57	La	$2 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-3}$	20
58	Ce	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-3}$	10
59	Pr	$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$	8
60	Nd	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	10

Atom. číslo	Prvek	Kamenná část	Metalickeá část	Země jako celek	Zemská kůra	Kůra/Země
1	2	3	4	5	6	7
62	Sm	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$(4 \cdot 10^{-4})$	4
63	Eu	$3 \cdot 10^{-5}$		$3 \cdot 10^{-5}$	$(1 \cdot 10^{-4})$	4
64	Gd	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$(7 \cdot 10^{-4})$	4
65	Tb	$5,8 \cdot 10^{-5}$		$5 \cdot 10^{-5}$	$(1 \cdot 10^{-4})$	2
66	Dy	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$	2
67	Ho	$6,6 \cdot 10^{-5}$		$6 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	2
68	Er	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	1
69	Tu	$3,4 \cdot 10^{-5}$		$3 \cdot 10^{-5}$	$(1 \cdot 10^{-4})$	3
70	Yb	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	1
71	Cp(Lu)	$6 \cdot 10^{-5}$		$6 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	2
72	Hf	$1 \cdot 10^{-4}$		$1 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	4
73	Ta	$3,8 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	6
74	W	$(1,6 \cdot 10^{-3})$	$8 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	0,06
75	Re	$2 \cdot 10^{-7}$	$(1 \cdot 10^{-4})$	$(7 \cdot 10^{-6})$	$1 \cdot 10^{-7}$	0,01
76	Os	0	$8 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$(10^{-6})$	$10^{-4}$
77	Ir	0	$4 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$10^{-7}$	0,003
78	Pt	$8 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$(5 \cdot 10^{-7})$	0,003
79	Au	0	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-7}$	0,01
80	Hg	$(1 \cdot 10^{-6})$	$3 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$	6
81	Tl	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-4}$	20
82	Pb	$2 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	8
83	Bi	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	1,5
88	Ra	$2 \cdot 10^{-13}$	$1,6 \cdot 10^{-13}$	$1,8 \cdot 10^{-13}$	$9 \cdot 10^{-11}$	50
90	Th	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	60
92	U	$6 \cdot 10^{-4}$	$4,8 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-4}$	54

obsahu metalického železa v těchto planetách a musíme hledat proces, který tyto rozdíly způsobil. Za tím účelem se Urey po několik let pokoušel modifikovat představu Kuiperovu o masivních protoplanetách.

Předpokládal, že tělesa asteroidního typu se nacházela v nitru protoplanet, kde byl jejich povrch zahříván a kde přitom došlo ve vnějších vrstvách k rozdělení kovu a silikátu a k částečnému vypaření silikátů. V poslední práci [16] došel však k závěru, že podobné protoplanety vůbec neexistovaly. Různý obsah metalického železa v zemských planetách, jak to předpokládá, pokouší se nyní vysvětlit velmi složitým procesem formování sluneční soustavy, jehož některé etapy nesouhlasí se současnými astronomickými poznatky. Je třeba ještě jednou zdůraznit, že přijmeme-li hypotézu Ramseyovu, pak výzkumy a komplikace tohoto druhu zcela odpadají.

4. Již v letech, kdy byly meteority považovány za příchozí z mezihvězdného prostoru, byly údaje o jejich složení využívány při studiu složení Země. Tehdy se to motivovalo prostě tím, že tato i ostatní tělesa jsou výsledkem evoluce silikátní látky. Dnes je známo, že meteority jsou úlomky asteroid, tj. těles, které patří tak jako Země k vnitřní zóně planetární soustavy. Tožnost isotopového složení četných prvků na Zemi a v meteoritech ukazuje na dobrou promíchanost protoplanetární látky (alespoň v mezích této zony). Pravda, asteroidy vznikaly na styku zony zemských planet a planet-obrů. Podstatná změna fyzikálně-chemických podmínek v mezích pásu asteroid byla pravděpodobně příčinou rozdílů v jejich složení, které se jeví ve složení

meteoritů. Před několika lety určil Urey a Craig [36] dvě skupiny meteoritů s různým obsahem železa, které spojovali se dvěma mateřskými asteroidami. Později objevil A. A. Javnel [37, 38] pět analogických skupin, které se liší hlavně obsahem niklu a železa. Proto, i kdyby se podařilo najít skutečné střední složení meteoritů a odstranit rušivý vliv jejich ničení v atmosféře a neúplnosti sběru, nezobrazoval by tento výsledek stejně zcela přesně složení celé Země.

Složení meteoritů může ovšem charakterisovat obsah jen těch prvků v Zemi, které tvoří látky netěkavé při teplotách řádově 0 °C. Vznik zemské atmosféry a hydrosféry souvisí pravděpodobně nejen s absorpcí plynů pevnými částicemi, nýbrž i s dopadáním na Zemi ledových těles, podobných jádru komet. Analýsa tohoto procesu dosud ještě nebyla provedena.

Při dnešních znalostech a možnostech zdá se nejsprávnějším využívat analýsy meteoritů k určení středního složení kamenné a metalické složky meteorické látky a domnívat se, že v Zemi mají tyto části totéž složení. Pokud se týče poměru kamene ke kovu, je třeba jej určit zvlášť. V práci z r. 1955 [9] bylo na základě četných nepřímých údajů předpokládáno, že váhový poměr kamene ke kovu je 6 : 1, tj. že kovu (současně s troilitem v něm obsaženým) je 14,3%. Dnes se zdá jako nejlepší hypotéza Bullenova [39], podle které sestává vnitřní jádro Země z niklového železa a je výsledkem diferenciací jádra (v obalu zůstávají silikát i kov promíchanými). Bohužel hustota a proto i hmota vnitřního jádra (jadérka) jsou známy špatně. Hmota jadérka činí přibližně 8% hmoty celého jádra. Tuto hodnotu také přijímáme jako část kovu při výpočtu středního složení Země jako celku. Většina chemických prvků se koncentruje v silikátové části látky, a proto se různé předpoklady o podílu kovu málo projevují na jejich obsahu.

Tabulka 1 obsahuje údaje o středním obsahu 78 chemických prvků v silikátové a metalické části meteorické látky (každá z těchto částí je zkoumána společně s troilitem v ní obsaženým). Tyto se poněkud liší od údajů uvěřitelných dříve [9,40], poněvadž byly přehlednuty S. V. Kozlovskou na základě nových analýs, jež se objevily v tisku. Střední složení celé Země (sloupec 5) bylo vypočteno, jak již bylo řečeno, za předpokladu, že metalická část činí 8% hmoty. Údaje sloupců 3 a 4 umožňují snadno přepočítat údaje ve sloupci 5 pro libovolný jiný procentový obsah kovu. Přitom se znatelně změnil pouze údaje asi pro desítku základních prvků přítomných ve větším množství, a asi pro desítku ostře vyjádřených siderofilních prvků přítomných prakticky pouze v kovu.

Srovnání s údaji A. P. Vinigradova [41] o složení zemské kůry, uvedenými ve sloupci 6, umožňuje zjistit prvky, které se koncentrovaly v zemské kůře v době jejího vytváření nebo naopak převážně zůstaly v obalu. V souhlase s poměry „kůra/Země“, uvedenými ve sloupci 7, koncentrovalo se v kůře těchto 25 prvků: Li, Be, N, B, F, Al, K, Ti, Rb, Sr, Zr, Nb, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Ta, Hg, Tl, Pb, Ra, Th, U (u nich je poměr „kůra/Země“  $\geq 5$ ). Deficitními je v kůře těchto 19 prvků: Mg, S, Cr, Fe, Co, Ni, Ge, Se, Ru, Rh, Pd, Cd, Te, W, Re, Os, Ir, Pt, Au (u nich je poměr „kůra/Země“  $\leq 0,2$ ).

5. Zvlášť důležitý je obsah radioaktivních prvků v Zemi. Ten musíme nutně znát při studiu termické historie Země. Nedávno určil Urey [42] střední koncentraci radioaktivních prvků v Zemi tak, že předpokládal, že následkem existence konvekce celkový vývin tepla v Zemském nitru je roven ztrátě tepla povrchem. Silikátová látka obalu má však viskozitu pravděpodobně

tak velkou (následkem vysokého tlaku), že konvekce nevzniká, nehledě na to, že gradient teploty patrně převyšuje adiabatický. Proto metoda použitá Ureyem, i když poskytuje správnou řádovou velikost, snadno může vést k obsahu dva až třikrát se lišícímu od skutečného. V minulém roce obrátil Urey [43] pozornost k odhadu obsahu radioaktivních prvků v Zemi z údajů o jejich obsahu v meteoritech, jak se to již dávno dělá v Ústavu fyziky Země. O. Ju. Šmidta AV SSSR [9, 40, 44].

V tabulce 1 byly přijaty údaje A. G. Starkové [45], které jsou sice založeny na malém počtu analys, ale jsou patrně nedaleko od skutečnosti, poněvadž, soudě podle teoretických výpočtů J. A. Ljubimové [46], dávají tok povrchem Země, blízký toku fakticky pozorovanému. I. J. Starik a M. M. Šac [47] dostali obsah uranu v silikátové části meteoritů rovný  $20 \cdot 10^{-8}$  g/g, tj. pětikrát větší, než předpokládala A. G. Starková. Přijmeme-li tak velkou hodnotu pro Zemi, pak tok tepla ze zemského nitra k povrchu by musel být několikrát větší než pozorovaný. Přijmeme-li naopak, jak to činí Urey [43], hodnotu  $1 \cdot 10^{-8}$  g/g, pak celkový vývin tepla v Zemi bude 1,5krát menší než tepelná ztráta a dokonce nebude možno nasbírat v celé Zemi dostatečné množství uranu k vysvětlení jeho faktického obsahu v zemské kůře.

Při obsahu radioaktivních prvků uvedeném v tabulce 1, dostáváme, že vývin tepla v Zemi převyšuje tepelnou ztrátu povrchem. Vnitřní část i Země se dále zahřívají, zatím co vnější vrstvy (do hloubky řádově 1000 km) již prošly teplotním maximum a nyní se ochlazují.

Prakticky všechno teplo zemského nitra je radiogenního původu. Hlavní část formování Země (nahromadění 95–97% hmoty) vyžadovala  $1-2 \cdot 10^8$  let. Proto teplo, které se uvolnilo při dopadech částic na povrch, mělo tendenci vyzářit do prostoru a pouze velmi slabě zahřívalo Zemi. Pokud se centrální části Země vytvořily o 100–200 milionů let dříve než povrchové a byly proto poněkud déle zahřívány radiogenním teplem, v zemském nitru vznikl teplotní gradient a existuje tudíž proud tepla směřující od jádra skrz obal. Je-li správné vysvětlení jádérka, dané Bullenem, pak se musela při jeho vytváření uvolnit energie a proud tepla z jádra se musel zeslbit. To umožňuje vysvětlit konvektivní pohyby v jádru, které, jak se předpokládá, jsou zdrojem geomagnetického pole. Poněvadž látka vnější části jádra se nachází v metalickém stavu, může být její viskozita (bez ohledu na obrovský tlak) dostatečně malá, tj. taková, že připouští konvekci.

6. Výše vyložený obraz vzniku chladné Země postupně se dále zahřívající nahromaděným radiogenním teplem, vede k představě o zdlouhavém formování zemské kůry jako výsledku fyzikálně-chemické a gravitační diferenciace látky vnějších vrstev Země [26, 48]. Při radioaktivním zahřívání těchto vrstev se po dosažení dostatečně vysoké teploty začaly tyto částečně roztavovat, tj. vytavovat lehkotavitelnější sloučeniny. Když se pak nahromadily v dostatečném množství, stoupaly k povrchu a na povrch, poněvadž měly menší hustotu.

Jak bylo řečeno v odst. 4, domníváme se, že střední složení celé Země je velmi blízké střednímu složení meteoritů. Na možnost získat z meteorické látky jistou část, která by měla složení zemské kůry, poukazovalo se již dávno. Např. Goldschmidt [49], když srovnal složení meteoritů a kůry, napsal: „Tak přicházíme k závěru, že by takové kamenné meteority mohly být obdobou počáteční látky zemských silikátních hornin v tom smyslu, že by naše zemská litosféra jako celek mohla mít složení podobné chondritům: avšak



v nejsvrchnějších nám přístupných částech litosféry jsou následkem frakční krystalisace zbylá magmata a mateřská magmata této frakční krystalisace obohacena. Taková zbylá magmata, jako např. granitových a nefelinosyenitových hornin, mají mnohem menší specifickou váhu, než silikáty chondritů, a proto v průběhu geologických dob se musely nashromáždit převážně v nejsvrchnějších vrstvách litosféry.“ (Str. 106—107.) Poněkud dále Goldschmidt opět říká: „Výsledky srovnání látkového složení silikátové části meteoritů se zemskými horninami v poměru ke vzácnějším prvkům rovněž souhlasí s hypotézou, že horniny zemského povrchu nám dostupné vznikly frakční krystalisací z magmatu, jehož složení přibližně odpovídá silikátním meteoritům“ (str. 108). Goldschmidt předpokládal vznik Země z roztaveného plynového zhuštění, a proto on sám nespojoval vznik kůry se zahříváním Země z chladného počátečního stavu.

Před několika lety byla na základě geologických údajů vyslovena Wilsonem idea o postupném vytváření zemské kůry. Od té doby jí dále úspěšně pracovává [50]. Potvrzují ji údaje o postupném růstu kontinentů, opírající se o měření stáří hornin.

Současné představy o postupném vytváření atmosféry a hydrosféry nahromaděním plynů a par, které se uvolňují ze zemského nitra (viz např. Rubey [51]), souhlasí rovněž s kosmogonickým závěrem o chladné akumulaci Země a jejím postupným zahřívání.

7. R. 1956 řekl Gutenberg [52], že „stále rostoucí počet astrofysiků a geofysiků považuje za pravděpodobné, že Země vznikla postupným hromaděním chladné látky a mnozí geologové vyslovili názor, že Země nikdy nebyla celá roztavená.“

Sovětští vědci mají velké úspěchy ve zdůvodnění takového procesu formování Země a ve studiu jejího dalšího vývoje a její dnešní stavby a složení na tomto základě.

*Přeložil dr. Jan Pícha*

#### Literatura

- [1] Чирвинский П. Н., *К вопросу о законах образования химических элементов во вселенной*, Изв. Дonsкого политехнич. ин-та, 7, otd. 2, 94, 1919.
- [2] Clarke F. W., *The date of geochemistry*, U. S. Geol. Surv. Bull., 770, 841, 1924.
- [3] Link G., *Aufbau des Erdballs*, Jena, 1924.
- [4] Washington H. S., *The chemical composition of the Earth*, Am. J. Sci., 9, 351, 1925.
- [5] Niggli P., *Geochemie und Konstitution der Atomkerne*, Fennia, 50, No 6, 3, 1928.
- [6] Заславский И. И., *Химический состав земного ядра*, Природа, 20, 754, 1931.
- [7] Saslawsky J., *Zusammensetzung der Meteorite und des Erdballs*, Min. Petr. Mitt. 43, 144, 1932.
- [8] Ферсман А. Е., *Geochemija*, t. I, M., 1932.
- [9] Левин Б. Ю., *Sostav Zemli*, Tr. Geofiz. in-ta AN SSSR, No 26 (1953), 1955.
- [10] Шмидт О. Ю., *Роль твердых частиц в планетной космогонии*, Природа, No 11, 1956 (viz také Mémoires Soc. R. Sci. Liège, 15, 638, 1955).
- [11] Edgeworth K. E., *The origin and evolution of the solar system*, M. N., 109, 600, 1949.
- [12] Hoyle F., *Frontiers of astronomy*, London, 1955.
- [13] Gold T., *Doklad na geofyzické diskuzii*, viz Obs., 76, 219, 1956; Nature, 179, 121, 1957.
- [14] Kuiper G. P., *The formation of the planets*, J. Roy. Astr. Soc. Canada, 50, 57, 105, 158, 1956.
- [15] Urey H. C., *On the dissipation of gas and volatilized elements from protoplanets*, Ap. J. suppl., 1, No. 6, 147, 1954.
- [16] Urey N. C., *Diamonds, meteorites and the origin of the solar system*, Ap. J., 124, 623, 1956.

- [17] Шкловский И. С., *O vozmožnosti objašnjenja različitj v chimičeskoj sostavi Zemli i Solnca termičeskoj disipacijej legkih gazov*, Astr. žurn., 28, 234, 1951 (sm. takže DAN SSSR, 76, 193, 1951).
- [18] Фесенков В. Г., *O ranněj termičeskoj istorii Zemli*, Astr. žurn., 34, 105, 1957.
- [19] Сафронов В. С. и Рускол Е. Л., *O vozmožnosti vznikovenija turbulentnosti v protoplannětnom oblake*, DAN SSSR, 108, 413, 1956.
- [20] Гуревич Л. Э. и Лебединский А. И., *Ob obrazovaniji planēt*, Izv. AN SSSR, ser. fiz. 14, 765, 1950 (viz také DAN SSSR, 74, 673, 905, 1061, 1950).
- [21] Шмидт О. Ю., *O zakoně planětnych rasstojanij*, DAN SSSR, 52, 673, 1946.
- [22] Шмидт О. Ю., *Voznikovenije planēt i ich sputnikov*, Tr. Geofiz. in-ta AN SSSR, No 11 (138), 1950; Izv. AN SSSR, ser. fiz., 14, 29, 1950.
- [23] Donn B. a. Urey H. C., *On the mechanism of comet outbursts and the chemical composition of comets*, Ap. J., 123, 339, 1956.
- [24] Urey H. C. a. Donn B., *Chemical heating for meteorites*, Ap. J., 124, 307, 1956.
- [25] Левин Б. Ю., *Strojenije Zemli i planēt i mečeoritnaja gipoteza ich proischožděnija*, Priroda, No 10, 1949.
- [26] Левин Б. Ю., *Někotoryje voprosy razvitija, strojenija i sostava Zemli*, Izv. AN SSSR, ser. geofiz., No 4, 1953.
- [27] Levin B. J., *On the character and causes of the separation of molecules during planet formation*, Mém. Soc. R. Sci. Liège, 18, 186, 1957.
- [28] Urey H. C., *The origin and development of the Earth and other terrestrial planets*, Geochim. et Cosmochim. Acta, 1, 209, 1951.
- [29] Urey H. C., *The planets. Their origin and development*, New Haven, 1952.
- [30] Urey H. C., *Chemical evidence regarding the Earth's origin*, XIII Intern. Congr. Pure Appl. Chemistry, 1953; 188, Upsala, 1954.
- [31] Urey H. C., *The origin of the Earth*, "Nuclear geology", Ed. by H. Faul, New York, London, 355, 1954.
- [32] Лодочников В. Н., *Někotoryje obščije voprosy, svjazannuje s magmoj, dajučšej bazaltovuje porody*, Zap. Vses. mineralog. ob-va, 64, 207, 1939.
- [33] Ramsey W., *On the constitution of the terrestrial planets*, M. N., 108, 406, 1958.
- [34] Ramsey W., *On the nature of the Earth's core*, M. N. geophys. suppl., 5, 409, 1949.
- [35] Козловская С. В., *Sravnitelnyj analiz vnutrenogo strojenija i sostava zemnyh planēt i sputnikov*, DAN SSSR, 92, 903, 1953.
- [36] Urey H. C., a. Craig H., *The composition of the stone meteorites and the origin of the meteorites*, Geochim. et Cosmochim. Acta, 436, 1953.
- [37] Явнель А. А., *Zakonoměrnosti sostava železnych mečeoritov i problema proischožděnija mečeoritov*, DAN SSSR, 102, 477, 1955.
- [38] Явнель А. А., *Zakonoměrnosti v sostave mečeoritnogo věščestva i klassifikacija železnych mečeoritov*, Geochimija, No 2, 1956.
- [39] Bullen K. E., *On the constitution of Mars*, M. N. geophys. suppl., 7, 271, 1957.
- [40] Левин Б. Ю., Козловская С. В., Старкова А. Г., *Srednij chimičeskij sostav mečeoritov*, Mečeoritika, vyp. 14, 1956.
- [41] Виноградов А. П., *Zakonoměrnosti raspredělenija chimičeskich elementov v zemnoj kore*, Geochimija, No 1, 1956.
- [42] Urey H. C., *The cosmic abundances of potassium, uranium, and thorium and the heat balances of the Earth, the Moon and Mars*, Proc. Nat. Acad. Sci., 41, 127, 1955.
- [43] Urey H. C., *The Cosmic abundances of potassium, uranium and thorium and the heat balances of the Earth, the Moon and Mars*, Proc. Nat. Acad. Sci., 42, 898, 1956.
- [44] Любимова Е. А., *Vlijanije radioaktivnogo raspada na tēplovoy režim Zemli*, Izv. AN SSSR, ser. geofiz. No 2, 1952, 1955.
- [45] Старкова А. Г., *Soděržanije radioaktivnyh elementov v mečeoritach*, Mečeoritika, vyp. 13, 1955.
- [46] Любимова Е. А., *O termičeskoj istorii Zemli i jejo geofizičeskich posledstvijach* DAN SSSR 107, 55, 1956.
- [47] Старик И. Е. и Шац М. М., *Opredělenije urana v kamennyh i železnych mečeoritach*, Geochimija, No 2, 1956.
- [48] Шмидт О. Ю., *Proischožděnije i rannaja evoljucija Zemli*, Tr. Geofiz. in-ta AN SSSR, No 26 (153), 1955.
- [49] Goldschmidt V. M., *Geochemische Verteilungsgesetze der Elemente*, IX, Oslo, 1938.
- [50] Wilson J. T., *Origin of the Earth's crust*, Nature, 179, 228, 1957.
- [51] Rubey W. W., *Geologic history of sea water*, Bull. Geol. Soc. Am., 63, 1111, 1951.
- [52] Gutenberg B., *Neue Ergebnisse über den Aufbau der Erde*, Geol. Rundschau, 45, 342, 1956.