

## 90 ROKOV PERIODICKÉHO ZÁKONA

MIROSLAV ZIKMUND

Oddelenie anorganickej chémie Chemického ústavu Slovenskej akadémie vied v Bratislave

Na rozhraní 18. a 19. storočia padlo pod náporom rozsiahlych experimentálnych výskumov vyše dvetisícročné panstvo aristotelovských predstáv o prvkoch (elementoch) a vznikol nový názor na prvky ako najjednoduchšie chemicky nedeliteľné látky, z ktorých sú zložené všetky veci v prírode. V týchto časoch bol objavený aj zákon stálosti zloženia zlúčenín a zákon viacerých zlučovacích pomerov, vyjadrujúci na základe atomistických predstáv o zložení látok princíp nespojitého prechodu od jednej zlúčeniny k druhej. Jednotlivé prvky dostali súčasne svoju špecifickú kvantitatívnu charakteristiku v podobe atómových váh.

So zdokonaľovaním metód chemického výskumu ustavične rástol aj počet objavených chemických prvkov. Ich podrobným štúdiom sa hromadilo obrovské množstvo poznatkov, v ktorých sa chemici čoskoro nevedeli orientovať, keďže neboli známe nijaké všeobecné súvislosti medzi nimi. Tým sa súčasne spomaľovalo využívanie zistených poznatkov a ďalší rozvoj vedeckého bádania. Situácia bola o to zložitejšia, že až v šesťdesiatych rokoch minulého storočia sa zaviedol do chémie pojem mocenstva a začalo sa rozlišovať medzi ekvivalentovou, atómovou a molekulovou váhou.

Pôvodná hrubá, rýdzo kvalitatívna klasifikácia prvkov na kovy a nekovy čoskoro nepostačovala. Preto sa začalo stále viac prizerať na kvantitatívne charakteristiky prvkov, predovšetkým na ich atómové váhy. Prvé pokusy na tomto základe vykonali najmä Döbereiner (1817, „pravidlo triád“), Pettenkofer (1850), Kramers (1852), Gladstone (1853), Cooke (1854), Dumas (1857), Lenssen (1857), Odling (1857), deChancourtois (1862, „vis tellurique“), Newlands (1864, „zákon oktáv“) a Meyer (1864) [4, 63, 212, 224, 233, 254, 291, 292, 302, 303, 322, 323, 374].

Pozoruhodné sú predovšetkým práce J. Newlandsa a L. Meyera. Newlands usporiadal 61 vtedy známych prvkov podľa ich stúpajúcich ekvivalentových váh a zistil, že v niektorých prípadoch ôsmy prvok má podobné vlastnosti ako prvý. Jeho tabuľka mala však celý rad nedostatkov. Na niektorých miestach boli súčasne dva prvky (Co, Ni; Ce, La; Ba, V a i.) a v tabuľke bolo veľa výnimiek z uvedeného pravidla.

V Meyerovej tabuľke [213] bolo 28 prvkov usporiadaných v poradí stúpajúcich atómových váh do 6 stĺpcov, pričom v každom stĺpci boli prvky s rovnakými mocenstvami. Meyer zistil, že v každom stĺpci rozdiel v atómových váhach susedných prvkov rovnakým spôsobom progresívne vzrastá. Ani Newlands ani Meyer nevyvodili zo svojich pozorovaní nijaké závery, na základe ktorých by bolo možné usudzovať na ďalšie vzťahy medzi prvkami.

Na riešenie tejto úlohy sa podujal profesor petrohradskej univerzity D. I. Mendelejev, ktorý si pri spisovaní svojej učebnice *Základy chémie* [211] zreteľne uvedomoval, že chémia tých čias sa ešte nevypracovala na vedu, ktorej mnohotvárný obsah by tvoril jedinú sústavu, pretože „budova vedy potrebuje nielen materiál, ale aj plán“. Pre svoje

štúdium vzťahov medzi prvkami si zvolil originálnu, samostatnú cestu, nezávislú od predchádzajúcich prác [19, 48—53, 78, 83, 95, 153—161, 169, 175, 338, 352, 367, 373]. Pri voľbe kritérií bral do úvahy, že v tých časoch bol k dispozícii „obširny faktický materiál len pre dve presne zmerateľné vlastnosti prvkov, a to pre atómové váhy a pre schopnosť jestvovať v rozličných formách zlúčenín“. Rozmanité fyzikálne vlastnosti prvkov, ako napr. rozťažnosť, hustota, index lomu, závisia od viacerých faktorov a neboli ešte dostatočne preskúmané. Naproti tomu mnohé chemické zvláštnosti prvkov, napr. ich schopnosť tvoriť rôzne stále zlúčeniny, boli charakterizované len kvalitatívne, takže sa nedali použiť za základ porovnávania, i keď ich bolo treba brať do úvahy.

Mendelejev pri svojom štúdiu usporiadal všetkých 63 vtedy známych prvkov v poradí stúpajúcich atómových váh, pretože tieto nezávisia od ostatných vlastností prvkov, a porovnával predovšetkým zloženie ich zlúčenín. Osobitnú pozornosť venoval najmä kyslíčnikom, keďže ich tvoria takmer všetky prvky, nie je ich pri jednotlivých prvkoch mnoho, niet medzi nimi plynulých prechodov, sú aritmeticky jednoduché a opakujú sa. Na rozdiel od predchádzajúcich bádateľov pri porovnávaní si všimol nielen podobné prvky (napr. alkalické kovy), ale aj prvky s blízkymi atómovými váhami, avšak s odlišnými chemickými vlastnosťami (alkalické kovy a halogény). Takýmto spôsobom zostavil rad prvkov, ktorý sa dal rozdeliť na úseky (periódy), po ktorých sa opakujú prvky s podobnými vlastnosťami. Ich usporiadaním za sebou vznikla v priebehu februára a marca 1869 periodická sústava prvkov (tab. 1)\* [205], ktorá sa stala novým matematickým základom chémie [46, 47, 128], vyjadreným nie v podobe závislosti spojitých funkcií — ako mnohé iné prírodné zákony — ale v podobe tabuľky zloženej z radov a stĺpcov.

Súčasne Mendelejev formuloval výsledky svojho štúdia v ôsmich bodoch (uvádzame ich v skrátenom a voľnejšom znení):

1. Prvky usporiadané v poradí stúpajúcich atómových váh prejavujú zreteľnú periodičnosť vlastností.

2. Chemicky podobné prvky majú alebo blízke atómové váhy (napr. Pt, Ir, Os), alebo atómové váhy pravidelne rastúce (napr. K, Rb, Cs).

3. Usporiadanie prvkov podľa stúpajúcich atómových váh odpovedá ich mocenstvu a do určitej miery aj rozdielom v ich chemickej povahe, ako to vidieť napr. v rade prvkov Li, Be, B, C, N, O, F.

4. Prvky, ktoré sa hojne vyskytujú v prírode, majú nízke atómové váhy a výrazné vlastnosti; sú to prvky typické.

5. Považa prvku je určená jeho atómovou váhou. Preto sa pri štúdiu zlúčenín musí prizerať nielen na počet a vlastnosti prvkov a na ich vzájomné pôsobenie, ale aj na ich atómové váhy.

6. Možno očakávať objav mnohých nových prvkov.

7. Na základe umiestenia prvku v periodickej sústave možno korigovať jeho atómovú váhu.

8. Z periodickej tabuľky možno vyvodzovať nové analógie medzi prvkami.

Obsah i forma zobrazenia periodickej sústavy prvkov podľahli už v prvých Mendelejevových prácach značnému vývinu. Využívajúc objavený nový prírodný zákon — periodický zákon (predbežne formulovaný najmä v bodoch 1 a 5) — Mendelejev prikročil k dobudovaniu svojej periodickej sústavy (tab. 2) a k rozsiahlej revízii atómových váh i zoskupení analogických prvkov. Súbežne prebiehala aj prestavba pôvodnej dlhej formy periodickej tabuľky na krátku formu (tab. 3) [206—210], pričom pôvodné verti-

\* V tabuľkách ponechávame vtedajšie symboly prvkov, v texte používame dnešné symboly prvkov.

Tabuľka 1

			Ti=50	Zr=90	?=180
			V=51	Nb=94	Ta=182
			Cr=52	Mo=96	W=186
			Mn=55	Rh=104,4	Pt=197,4
			Fe=56	Ru=104,4	Ir=198
		Ni=Co=59	Pl=106,6	Os=199	
H=1			Cu=63,4	Ag=108	Hg=200
Be=9,4	Mg=24		Zn=65,2	Cd=112	
B=11	Al=27,4		?=68	Ur=116	Au=197?
C=12	Si=28		?=70	Sn=118	
N=14	P=31		As=75	Sb=122	Bi=210?
O=16	S=32		Se=79,4	Te=128?	
F=19	Cl=35,5		Br=80	I=127	
Li=7 Na=23	K=39		Rb=85,4	Cs=133	Tl=204
	Ca=40		Sr=87,6	Ba=137	Pb=207
	?=45		Ce=92		
	?Er=56		La=94		
	?Yt=60		Di=95		
	?In=75,6		Th=118?		

Tabuľka 2

			K = 39	Rb = 85	Cs = 133	—	—
			Ca = 40	Sr = 87	Ba = 137	—	—
			—	?Yt = 88?	?Di = 138?	Er = 178?	—
			Ti = 48?	Zr = 90	Ce = 140?	?La = 180?	Th = 231
			V = 51	Nb = 94	—	Ta = 182	—
			Cr = 52	Mo = 96	—	W = 184	U = 240
			Mn = 55	—	—	—	—
			Fe = 56	Ru = 104	—	Os = 195?	—
			Co = 59	Rh = 104	—	Ir = 197	—
			Ni = 59	Pd = 106	—	Pt = 198?	—
			Cu = 63	Ag = 108	—	Au = 199?	—
			Zn = 65	Cd = 112	—	Hg = 200	—
			—	In = 113	—	Tl = 204	—
			—	Sn = 118	—	Pb = 207	—
			—	Sb = 112	—	Bi = 208	—
			—	Te = 125?	—	—	—
			—	J = 127	—	—	—

Typické prvky

H = 1	Li = 7	Na = 23	Cu = 63
	Be = 9,4	Mg = 24	Zn = 65
	B = 11	Al = 27,3	—
	C = 12	Si = 28	—
	N = 14	P = 31	As = 75
	O = 16	S = 32	Se = 78
	F = 19	Cl = 35,5	Br = 80

Tabuľka 3

Rad	Skupina I — R <sub>2</sub> O	Skupina II — RO	Skupina III — R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Skupina IV RH <sub>4</sub> RO <sub>2</sub>	Skupina V RH <sub>3</sub> R <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Skupina VI RH <sub>2</sub> RO <sub>3</sub>	Skupina VII RH R <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	Skupina VIII — RO <sub>4</sub>
1	H=1							
2	Li=7	Be=9,4	B=11	C=12	N=14	O=16	F=19	
3	Na=23	Mg=24	Al=27,3	Si=28	P=31	S=32	Cl=35,5	
4	K=39	Ca=40	— = 44	Ti=48	V=51	Cr=52	Mn=55	Fe=56, Co=59, Ni=59, Cu=63
5	(Cu=63)	Zn=65	— = 68	— = 72	As=75	Se=78	Br=80	
6	Rb=85	Sr=87	?Yt=88	Zr=90	Nb=94	Mo=96	— = 100	Ru=104, Rh=104, Pd=106, Ag=108
7	(Ag=108)	Cd=112	In=113	Sn=118	Sb=122	Te=125	J=127	
8	Cs=133	Ba=137	?Di=138	?Ce=140	—	—	—	— — — —
9	(—)	—	—	—	—	—	—	
10	—	—	?Er=178	?La=180	Ta=182	W=184	—	Os=195, Ir=197, Pt=198, Au=199
11	(Au=199)	Hg=200	Tl=204	Pb=207	Bi=208	—	—	
12	—	—	—	Th=231	—	U=240	—	— — — —

kálne usporiadanie periód sa zmenilo na vhodnejšie horizontálne (so skupinami v podobe stĺpcov). Išlo pritom spočiatku predovšetkým len o náležité umiestenie ceritových prvkov, uránu a india v sústave, ako aj o odstránenie bezprostredného susedstva alkalických kovov a halogénov. Mendelejev však čoskoro zistil, že dlhá forma periodickej tabuľky vyjadruje vzťahy medzi prvkami jednostranne a neúplne, keďže zobrazuje výlučne úplné analógie medzi prvkami. Medzi prvkami jestvujú však dvojstranné vzťahy: na základe úplných i neúplných analógií (napr. Si—Sn a Si—Ti), ktoré odzrkadľuje práve krátka forma periodickej tabuľky.

Významnú úlohu pri správnom umiestovaní prvkov v periodickej sústave malo Mendelejevovo štúdium závislosti zmeny atómových (gramatómových) objemov prvkov od monotónnej zmeny ich atómových váh ako nezávisle premennej, keďže — ako sa zistilo — atómové váhy nie sú periodicou vlastnosťou atómov. Takto sa podarilo rozriešiť umiestenie niektorých ťažkých prvkov v poslednom rade krátkej tabuľky a odvodniť existenciu triád (Fe—Co—Ni, Ru—Rh—Pd, Os—Ir—Pt). Súčasne sa zistil periodický priebeh hodnôt atómových objemov prvkov s maximami pri alkalických kovoch a s minimami pri triádach ťažkých kovov, ako aj zákonitosť, že v krátkej tabuľke sú hlboké rozdiely vo vlastnostiach prvkov susedných radov, naproti tomu je veľká podobnosť medzi prvkami v každom druhom rade tabuľky.

Roku 1870, rok po Mendelejevovom štúdiu atómových objemov uverejnil svoju prácu o atómových objemoch aj L. M e y e r [214]. Jeho práca sa od Mendelejevovej líšila len tým, že zistená závislosť bola vyjadrená graficky.

V priebehu dvoch rokov (1869—1870) podarilo sa Mendelejevovi pretvoriť pôvodný variant periodickej tabuľky na jej dnešnú formu. Využíval pri tom poznatok, že vlastnosti prvku sú akýmsi priemerom vlastností jeho susedov v periodickej sústave v horizontálnom, vertikálnom, ako aj diagonálnom smere. Z analógií medzi prvkami v periodickej sústave usúdil, že mnohým prvkom treba opraviť v tých časoch všeobecne uznávané atómové váhy, aby sa tieto prvky dostali v sústave na správne miesta. V prípade Be, Y, In, Ce, La, Pr a Nd zväčšil atómovú váhu poldruhokrát, v prípade U a Th dvakrát, v prípade Er trikrát, v dôsledku čoho sa v periodickej tabuľke objavila siedma perióda. Poradie prvkov Rh—Ru—Pd a Pt—Ir—Os, vyplývajúce z nepresných atómových váh, zamenil za správne Ru—Rh—Pd a Os—Ir—Pt. Namiesto analógie vo vlastnostiach prvkov Al—U, Ag—Hg, Au—Al, Cs—Tl, Ba—Pb, ktorú v tých časoch všeobecne považovali za správnu, zaviedol analógiu Ag—Au, Cd—Hg, Al—In—Tl, Sn—Pb, W—U, Zr—Th.

Na Mendelejevovo pevné presvedčenie o platnosti periodického zákona osobitne výrazne poukazuje aj to, že neváhal zameniť poradie Ni—Co a J—Te, hoci tým zaviedol výnimku do pravidla o usporiadaní prvkov podľa stúpajúcich atómových váh. Oprávnenosť tejto „výnimky“, ako aj ďalších neskoršie objavených „nepravidielností“ Ar—K a Th—Pa sa podarilo objasniť až začiatkom 20. storočia objavom izotopie a atómového čísla [194, 301].

Avšak najskvelejším potvrdením správnosti periodického zákona, podľa ktorého vlastnosti prvkov a ich zlúčenín periodicky závisia od atómových váh prvkov (1871), bola Mendelejevova úspešná predpoveď existencie atómových váh a chemických i fyzikálnych vlastností prvkov, ktoré do tých čias ešte neboli objavené [210]: eka-alumínia (gálium, Lecoq de Boisbaudran 1875), eka-bóru (skandium, Nilson 1879) a eka-silícia (germánium, Winkler 1886). Veľmi presvedčivé bolo aj Mendelejevovo predvídanie existencie ďalších prvkov a predpovedanie ich atómových váh: Tc, Hf, Re, Po, At, Fr, Ra, Ac, Pa, ktoré boli len v menšej miere obklopené známymi dobre preskúmanými prvkami, takže pre robenie predpovedí boli tu menšie predpoklady. Pre všetky spomínané i niektoré ďalšie prvky rezervoval Mendelejev vo svojej periodickej tabuľke prázdne

miesta. Tým znovu dokázal, že bol prvý, ktorý objavil periodický zákon a pochopil jeho zmysel, na rozdiel od svojich predchodcov, ktorí len usporadúvali v tých časoch známe prvky za sebou podľa stúpajúcich atómových váh bez ohľadu na pravdepodobnosť existencie ešte neobjavených prvkov a bez prizerania na možnosť nesprávneho alebo nepresného stanovenia atómových váh. Tým sa im, prirodzene, periodičnosť vo vlastnostiach prvkov porušila a znemožňovalo sa objavenie zákonitých súvislostí [239, 371].

Sám Mendelejev zdôrazňoval, že ani jeden prírodný zákon, a teda ani periodický zákon, nebol objavený naraz, ale objavovanie jeho novších a novších stránok prebieha ustávične s rozvojom vedy. Podľa toho, ako podrobne sme poznali prírodný zákon, môžeme ho vyjadriť vo forme vedeckého zákona. Vyjadrenie vedeckého zákona závisí teda od historického vývoja, od množstva a hĺbky našich poznatkov. Existencia prírodného zákona sa začína uznávať nie vtedy, keď sa zrodila prvá myšlienka o ňom, ani nie vtedy, keď sa poznal jeho význam, ale až po overení jeho dôsledkov pokusmi. Preto si Mendelejev osobitne cenil prácu tých vedcov (Roscoe, de Boisbaudran, Nilson, Winkler, Brauner a i.), ktorí potvrdili použiteľnosť periodického zákona pri chemickom bádaní. Ich práce dokázali, že periodickému zákonu v budúcnosti nehrozí zánik, ale ho očakáva len dobudovanie a vývin“.

Oprávnenosť tohto Mendelejevovho presvedčenia sa skvele potvrdila objavom inertných plynov (1893—1901), pri ktorom podľa slov ich objaviteľa W. R a m s a y a „Mendelejevov periodický zákon je skutočným kompasom pre bádateľa“. Inertné plyny doplnili periodickú sústavu prvkov o nultú skupinu, ktorá oddeľuje alkalické kovy od halogénov, ako to predvídal už D. I. Mendelejev.

Veľmi zložitou otázkou v časoch D. I. Mendelejeva bolo správne zaradenie chemicky veľmi podobných prvkov vzácnych zemín do periodickej sústavy [345], a to tým viac, že neurčitý bol aj ich počet. Pri jej riešení veľké zásluhy si získal predovšetkým B. B r a u n e r [83]. Podarilo sa ju však definitívne rozriešiť až po Mendelejevovej smrti (1907), keď sa overil počet a správnosť poradia prvkov vzácnych zemín určením ich atómových čísiel a poznala sa ich elektrónová štruktúra (t. j. zistilo sa, že ide o lantanidy).

Veľké objavy, ktoré sa zrodili na začiatku 20. storočia, predovšetkým objav, že atómy nie sú najjednoduchšími časticami látok, ale sa skladajú z elektrónového obalu a z atómového jadra, ktoré tak isto je zloženou časticou, spôsobili, že periodický zákon, ktorý sa spočiatku rozvíjal ako empirické zovšeobecnenie faktov, zmenil sa na ich nevyhnutný dôsledok. Po etape konštatovania periodického zákona nastúpila etapa jeho objasňovania.

Avšak aj tu mal periodický zákon významnú úlohu. Periodičnosť vlastností prvkov nebola totiž v súhlase s názorom o nedeliteľnosti prvkov a ich atómov. Existencia periodického zákona si preto nevyhnutne vyžadovala, aby sa pripustila zložitosť atómov a periodičnosť ich štruktúry. Správnosť tohto názoru ako prvý experimentálne potvrdil J. J. T h o m s o n (1904—1907), ktorý sa za využitia periodického zákona pokúsil objasniť vzťahy medzi spektrálnymi a chemickými vlastnosťami atómov, pričom došiel k záveru, že v atóme nejstávajú všetky možné elektrónové orbity, ale len niektoré, charakteristické pre jednotlivé prvky.

Rozhodujúci význam pre objasňovanie periodického zákona mal Moseleyov objav (1913), že z charakteristického röntgenového spektra prvkov možno zistiť náboj jadra ich atómov, tzv. atómové číslo. Toto, ako sa zistilo, jednoznačne určuje umiestenie každého prvku v periodickej sústave (van den Broek 1913). Treba ho preto pri štúdiu periodičnosti brať za základ namiesto atómových váh, ktoré sú priemernými hodnotami, charakterizujúcimi v prírode existujúce prvky ako zmes izotopov (objavených pri štúdiu rádioaktivity). Spočiatku zistená periodická závislosť vlastností prvkov od atómovej váhy

súvisí s tým, že náboj jadra (počet protónov) a masa jadra (určená úhrnným počtom protónov a neutrónov) sa menia takmer proporcionálne.

V dôsledku tohto objavu sa periodický zákon stal aj základom rozvoja teoretickej a experimentálnej fyziky atómu. Ako prvý usiloval sa ho využiť N. B o h r (1921) [39—41] pri rozpracúvaní teórie elektrónovej štruktúry ťažších atómov, pričom sa súčasne pridržia Thomasonových predstáv o elektrónovej štruktúre atómov a Kosselovej teórie o stálosti osemelektrónových zoskupení v atóme. Hoci tento pokus o zistenie vzťahov medzi periodickým zákonom a elektrónovou štruktúrou nebol úspešný, umožnil Paulimu na základe kvantovo-mechanických úvah formulovať princíp výlučnosti, ktorý ohraničuje počet možných stavov elektrónov v atómoch.

Pauliho princíp bol odvodený za použitia spektrálnych údajov, charakterizujúcich elektrónovú štruktúru atómov. Jej odrazom sú chemické vlastnosti prvkov, podriaďujúce sa periodickému zákonu. Preto Pauliho princíp je nevyhnutný pri rozpracúvaní teórie periodického zákona, avšak sám ho nemôže nahradiť, keďže tu majú dôležitú úlohu aj iné zákonitosti, ktoré sa uplatňujú pri výstavbe elektrónového obalu atómu, najmä princíp minima celkovej energie elektrónových vrstiev v stabilných stavoch atómu, ďalej zákony výstavby atómových jadier, ako aj zákony chemickej väzby, termodynamiky a štatistiky. Preto periodický zákon je omnoho hlbší než Pauliho princíp a zahrnuje oveľa širší okruh javov.

Štúdium atómov ukázalo, že periodičnosť vlastností prvkov je podmienená periodičnosťou v zmene štruktúry elektrónového obalu pri zväčšovaní počtu elektrónov. Pretože v rade analogických prvkov sú elektrónové štruktúry podobné, avšak nie totožné, pri prechode od jedného prvku k druhému v každom takomto rade nenastáva prosté opakovanie vlastností, ale viac alebo menej zrejmä zákonitá zmena v tom alebo inom smere. Táto zmena je určovaná predovšetkým zmenou atómových polomerov analogických prvkov v závislosti od oxydačného stupňa a počtu elektrónových vrstiev. Práce v tejto oblasti nie sú ešte úplne rozvinuté. Osobitne významné je najmä štúdium odchýlok od princípu postupného zaplňania elektrónových vrstiev a s tým súvisiaca otázka prechodných kovov, lantanidov a aktinidov.

Tým, že teória štruktúry atómov objasnila periodické opakovanie obdobných elektrónových útvarov pri výstavbe elektrónového obalu atómov, odhalila súčasne fyzikálny zmysel periodického zákona [139]. Možno povedať, že len s vývinom tejto teórie sme začali periodický zákon chápať nie formálne, ale v jeho príčinných súvislostiach [38—41, 79, 80, 116, 152, 166, 170, 225, 240, 264, 321, 335, 336, 349, 363].

Pretože chemické i mnohé fyzikálne vlastnosti prvkov závisia od elektrónovej štruktúry atómov, možno na ich štúdium z hľadiska periodického zákona využívať napr. magnetické momenty atómov a iónov [252], avšak najmä spektrálne termy a ionizačné potenciály, ktoré jednoznačne charakterizujú vonkajšie elektrónové vrstvy izolovaných atómov. Tieto metódy v dnešných časoch už takmer úplne zatlačili pôvodný Mendelejevom používaný spôsob porovnávacieho štúdia prvkov na základe atómovej váhy (atómového čísla) prvkov a ich schopnosti tvoriť určité typy zlúčenín. Je to preto, lebo tieto typy vždy závisia od partnera, v niektorých prípadoch sú termodynamicky nestále ( $MgH_2$ ,  $Bi_2O_5$ ), málo charakteristické pre daný prvok ( $K_2O$ ) alebo neodpovedajú danej skupine periodickej sústavy ( $Fe_2O_3$ ,  $NiO$ ). Pritom periodičnosť sa prejavuje tým zložitejšie, čím zložitejšia je štruktúra látky obsahujúcej skúmaný prvok. V súvislosti s tým aj mocenstvo (oxydačné číslo) vo všeobecnosti závisí od povahy vzájomne sa zlučujúcich prvkov. Maximálne mocenstvo prvkov napr. voči kyslíku má tak isto periodický charakter [75, 107, 143, 223, 280, 381].

Naproti tomu priebeh vlastností izolovaných atómov a iónov odzrkadľuje periodický zákon v neporušenej forme. Veľmi rozsiahle je predovšetkým štúdium ich energetických charakteristík, najmä ionizačných potenciálov [10, 58, 79, 94, 142, 177, 223, 340], entropie [102, 145, 164], zlučovacích tepiel [94, 151, 178, 179, 223, 340—342] a i. Pri tom sa zistilo, že prislúšné hodnoty jednotlivých veličín sa menia viac alebo menej periodicky nielen v periódach, ale aj v skupinách periodickej sústavy. Tento jav je spôsobený sekundárnou periodičnosťou vlastností prvkov hlavných podskupín periodickej sústavy, ktorú r. 1915 objavil J. V. Biron [31]. Sekundárna periodičnosť sa uplatňuje na tých miestach periodickej sústavy, kde sa zaplňajú elektrónové orbity  $d$  a  $f$ , čím sa spevňuje pútanie vonkajších  $s$  a  $p$  elektrónov atómovým jadrom prislúšného prvku [340].

Sekundárnou periodičnosťou možno objasniť rozličné nepravidelnosti v hlavných podskupinách periodickej sústavy, ako napr. stálosť  $\text{GeO}$  a  $\text{PbO}$  na rozdiel od  $\text{CO}$ ,  $\text{SiO}$  a  $\text{SnO}$ , existenciu  $\text{PCl}_5$  a  $\text{SbCl}_5$ , avšak nie  $\text{AsCl}_5$ , oxydačné vlastnosti  $\text{N(V)}$  a  $\text{As(V)}$ , avšak nie  $\text{P(V)}$ , silnejšie oxydačné vlastnosti  $\text{Se(IV)}$  a  $\text{VI}$  v porovnaní s  $\text{S(IV)}$  a  $\text{VI}$ , nejestvovanie najvyšších kyslíčnikov fluóru a brómu, existenciu  $\text{OsO}_4$ , avšak nie  $\text{FeO}_4$  atd. [10, 20, 21, 28, 134, 147, 176—179, 189, 273, 340, 343, 347]. Na týchto príkladoch vidieť, ako hlboko vplyva periodičnosť štruktúry elektrónového obalu na vlastnosti chemických zlúčenín. Využitie týchto vzťahov umožňuje sledovať periodičnosť v rozmanitých skupinách zlúčenín jednotlivých prvkov, posudzovať oprávnenosť zaradenia prvkov do podskupín periodickej sústavy atd. [59, 61, 81, 99, 100, 136, 140, 229, 246, 249, 257, 281, 293, 368].

Pozoruhodné sú pokusy o štúdium komplexných zlúčenín [77, 114, 115] a metaloorganických zlúčenín [12, 132] z hľadiska periodickeho zákona. Objavujú sa už aj snahy o praktické využitie získaných poznatkov, ako je to v prípade štúdia vlastností skiel v závislosti od postavenia iónov v periodickej sústave [174, 314], ďalej v prípade štruktúry polovodičov [217] a zlúčenín premenného zloženia [10, 11], so zreteľom na umiestenie prvkov v periodickej sústave a i.

Pomerne dôkladne je už prepracovaný pokus o dôkaz, že analytická klasifikácia iónov, založená na sírovodíkovom spôsobe, je klasifikáciou prirodzenou, ktorá vyplýva zo štruktúry iónov, ich nábojov a rozmerov a priamo súvisí s periodickou sústavou prvkov [34, 35, 74, 142, 221]. V podstate sa zistilo, že ľahko deformovateľný anión  $\text{S}^{2-}$  tvorí s kationmi, ktoré majú vonkajšiu 18 elektrónovú a  $18 + 2$  elektrónovú vrstvu, spravidla ťažko rozpustné sírniky vyvrážateľné sírovodíkom. Avšak ak takéto kationy nemajú súčasne aj vnútornú 18 elektrónovú alebo 32 elektrónovú vrstvu, vznikajúce sírniky sú ľahšie rozpustné, takže ich treba zrážať sírnikom amónnym. Kationy so zakončenou vonkajšou dvojelektrónovou alebo osemelektrónovou vrstvou ťažko rozpustné sírniky netvorí. Čím nižší je iónový potenciál kationu, tým menej rozpustný je vznikajúci sírnik. Ohľadobné závislosti možno odvodiť aj pre tvorbu hydroxydov.

Úspešne sa rozvíja aj využívanie všeobecných kryštalochemických zákonitostí kryštálových štruktúr prvkov na odôvodňovanie umiestenia prvkov do podskupín periodickej sústavy. Kryštalochemická metóda sa od ostatných chemických metód líši z dvoch hľadísk: 1. je to metóda statická, ktorá skúma látku v stave pokoja; 2. atómy prvku sú v kryštalickom stave zlúčené len samy so sebou, takže tu nedochádza k ovplyvňovaniu ich vlastností atómami iných prvkov v procese reakcie. Nevýhodou tejto metódy je, že mnohé prvky tvoria v tuhom skupenstve viaceré polymorfné modifikácie, v dôsledku čoho sa porovnávanie stáva zložitejším. Treba pripomenúť, že ani hodnotením kryštalochemických údajov sa v literatúre nedochádza k rovnakým záverom [42—45, 241, 276, 359, 360, 386, 387, 397].



Mnohé kryštalochemické charakteristiky prvkov sa veľmi výrazne podriaďujú periodickému zákonu. Vztahuje sa to napr. na iónové polomery [45, 177, 223, 241], iónové potenciály [58, 94, 142], atómové polomery [44, 241, 387], klarky [93], eky [94], atómové a iónové refrakcie [18], elektronegativity atómov [242], kryštalochemické elektronegativity iónov [150a] a ďalšie veličiny závislé od periodičnosti v elektrónovej štruktúre atómov [29, 56, 57, 110, 111, 131, 133, 184, 199, 243, 305, 339, 344, 364 389].

Periodický zákon je aj základom pre porovnávanie povahy kovových zliatin. Vychádza sa pritom z poznatku, že chemické vlastnosti atómu závisia aj od povahy ostatných atómov, ktorými je daný atóm obklopený. Preto sú na štúdium takýchto sústav osobitne vhodné metódy fyzikálno-chemickej analýzy. Chemicky podobné prvky tvoria pritom analogické diagramy zloženie—vlastnosť. Napríklad tvrdosť fáz obsahujúcich arzenidy niklu v sústave železo—antimón, kobalt—antimón a nikel—antimón sa mení zákonite v závislosti od umiestenia zložiek zliatin v periodickej sústave prvkov [5, 6, 172]. Keďže chemické vlastnosti prvkov závisia nielen od štruktúry fázových diagramov kovových zliatin, ale aj od kryštálovej štruktúry fáz vznikajúcich v danej sústave, zhoda kryštálových štruktúr fáz tvorených analogickými prvkami potvrdzuje význam periodického zákona aj pre kryštalochémiu kovových zliatin. Z umiestenia jednotlivých kovov v periodickej sústave možno usúdiť, ktoré kovy budú navzájom tvoriť spojitú tuhú roztoky, ohraničené tuhé roztoky s kovovými zlúčeninami, kovové zlúčeniny bez tuhých roztokov alebo napokon iónové zlúčeniny, prípadne ktoré kovy nebudú spolu vôbec reagovať. Zoskupenia prvkov s takýmito vlastnosťami tvoria v periodickej sústave kompaktné ohraničené oblasti. Ich vyznačením v periodickej tabuľke dostaneme metalochemickú tabuľku prvkov, ktorá uľahčuje klasifikáciu kovov a ich vzájomných reakcií [171].

Za najpodrobnejšie preskúmané možno považovať využitie periodického zákona v geochemii, predovšetkým zásluhou A. F. F e r s m a n a [38—94]. Význam periodického zákona pre geochémiu charakterizuje Fersman takto: Mendelejevov periodický zákon tak hlboko a všestranne usmerňuje zoskupovanie, rozmiestovanie, migráciu i koncentrovanie chemických prvkov v prírode, že je oveľa ľahšie vymenovať tie javy zemskej a kozmickej chémie, kde by sa n e u p l a t ň o v a l, než čo len trochu systematicky a úplne objasniť jeho uplatnenie vo všetkých tých rozmanitých geochemických procesoch, ktoré prebiehajú okolo nás, začínajú teoretickými otázkami o ešte tajomných mimozemských telesách (meteoritoch) a končiac tvorbou mohutných zhlukov úžitkových prvkov.

Objasňovanie úlohy Mendelejevovho periodického zákona v geochemii je takmer rovnocenné s objasňovaním celej geochemie z hľadiska jej nových vývinových smerov, začínajú problémom chovania sa atómu prvku v štruktúre prírodného kryštálu, t. j. kryštalochémiu, a končiac zákonmi rozšírenia atómov a ich kvantitatívnym vyhodnotením v atmosférach hviezd, s čím napokon súvisia aj zákony klarkov zemskej kôry.“ Výsledkom takéhoto komplexného štúdia je formulácia hlavného geochemického zákona, podľa ktorého rozšírenie prvkov v zemskej kôre závisí od štruktúry ich atómov [58, 81, 94, 279, 390]. Jeho akýmsi názorným konkretizovaním je veľký počet geochemických tabuliek [27, 94, 109, 279, 312, 316, 334, 369, 390], odzrkadľujúcich rozličné stránky prejavu periodického zákona v geochemii. Pre rozsiahlosť materiálu nie je možné ani len zbežne sa tu zapodievať klasifikáciou prvkov z hľadiska geochemie alebo podrobnejšie rozoberať význam geochemie pri objavovaní nových prvkov a nových zásob surovín pre hutnícky, chemický a stavebnícky priemysel [55, 82, 168, 226, 227].

V. M. G o l d s c h m i d t [109] postavil pred geochémiu dve najdôležitejšie úlohy. Prvou z nich je štúdium zákonitosti, ktoré určujú relatívne úhrnné množstvá jednotlivých prvkov v prírode. Druhou úlohou je objavenie zákonitosti, podľa ktorých sa rozmiestujú jednotlivé prvky do rozličných minerálov a hornín. Zatiaľ čo spôsob a priebeh

rozmiestovania prvkov závisí od vlastností elektrónového obalu atómov, takže sa musí študovať chemickými metódami, množstvo jednotlivých prvkov v prírode je určené vlastnosťami atómových jadier, ich spôsobnosťou premieňať sa za vzniku nových prvkov. Z toho vyplýva veľká dôležitosť štúdia rádioaktivity a jadrových reakcií pre modernú geochémiu.

Aj v tejto novej oblasti výskumu má periodický zákon rozhodujúcu úlohu, a to predovšetkým v dôsledku objasnenia vzťahov medzi premenami atómových jadier a umiestnením vznikajúcich prvkov v periodickej sústave (posunový zákon, Soddy a Fajans 1913). Posunový zákon umožnil predvídať priebeh jadrových reakcií pri rádioaktívnych premenách, pri príprave nových izotopov známych prvkov a napokon pri syntéze nových prvkov, ktoré jednak ešte donedávna chýbali v klasickej periodickej sústave (Tc, Pm, At, Fr), jednak ju doplnili o transuránové prvky (Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm, Md, No) [1, 65, 66, 108, 124, 163, 230, 263, 269, 270, 289, 290, 313, 371, 386].

V prípade transuránových prvkov výskum ich elektrónovej štruktúry ukázal, že ide o obdobu lantanidov, kde sa elektróny tak isto dopĺňajú do orbitov  $f$ . Pretože tento nový súbor prvkov sa začína za aktíniom, dostal pomenovanie aktinidy [282—285]. Proti takejto klasifikácii sa vzniesli v literatúre námietky, upozorňujúce na to, že so zreteľom na určitú odlišnosť by bolo správnejšie transurány pokladať za uranidy [125—127], takže otázku nemožno ešte považovať za definitívne uzavretú. Najnovšie výskumy [73, 285] svedčia v prospech aktinidovej teórie, pričom chemické vlastnosti aktinidov odpovedajú chemickým vlastnostiam analogických lantanidov (napr. Eu—Am, Gd—Cm, Tb—Bk, Dy—Cf, . . . , Tm—Md). Využitím tejto podobnosti bolo možné uskutočňovať identifikačné chemické reakcie aktinidov s nepatrnými množstvami látok (napr. za „makropokus“ sa považuje už upotrebenie 0,6  $\mu\text{g}$   $\text{BkCl}_3$ ).

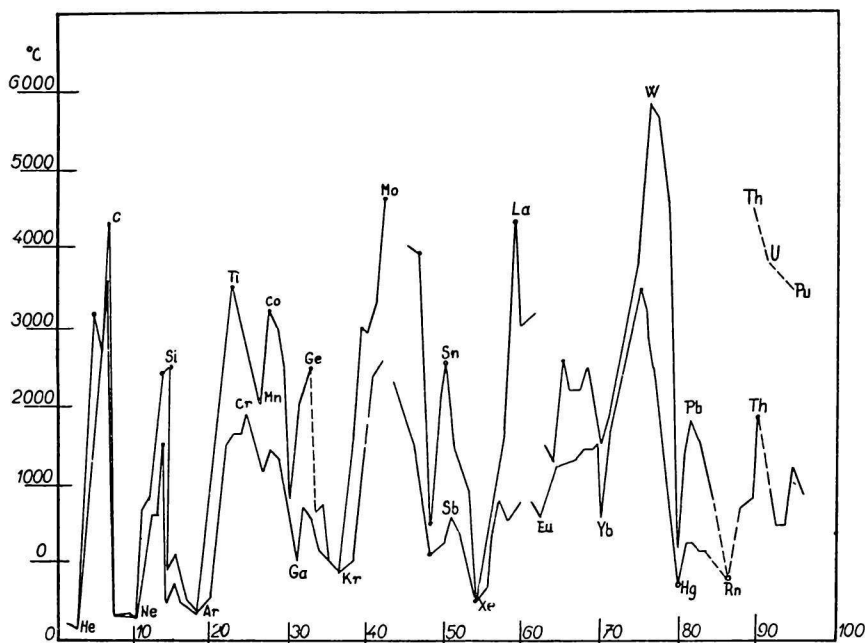
Podľa aktinidovej teórie prvok s atómovým číslom 103 bude eka-lutécium, naproti tomu prvky 104, 105, 106 atď. budú analógmi hafnia, tantalu, volfrámu atď. Je pozoruhodné, že vcelku úspešne predpovedal existenciu a niektoré vlastnosti (analogiu s lantanidmi, mocenstvá, iónové polomery a i.) transuránových prvkov s at. č. 93—98 už r. 1934 V. M. G o l d s c h m i d t [109, porov. 386].

Pri štúdiu prirodzenej rádioaktivity na začiatku nášho storočia bolo objavených mnoho nových rádioaktívnych prvkov (rádioelementov), ktoré boli členmi rôznych rozpadových radov. Iba pre časť z nich boli voľné miesta v periodickej sústave. Čoskoro sa zistilo, že mnohé z nich sa líšia len rádioaktívnymi vlastnosťami, ale nemožno ich chemicky oddeliť ani navzájom, ani od niektorých obvyklých nerádioaktívnych prvkov. Keďže sa tieto látky od seba chemicky nelíšili, bolo treba vyvodiť záver, že v jedinom chemickom prvku môže súčasne existovať niekoľko druhov atómov (izotopov) líšiacich sa len masou a rýchlosťou i priebehom rádioaktívneho rozpadu (Soddy 1913).

Jav izotopie vniesol nový, doplnkový obsah do periodickej sústavy: Každému miestu v periodickej sústave môže odpovedať nie iba jeden druh atómov, ale súčasne niekoľko druhov atómov — izotopov — líšiacich sa od seba masou (masovým číslom), pričom všetky majú rovnaký náboj jadra (atómové číslo) a rovnaké chemické vlastnosti (elektrónovú štruktúru). Hoci dnes už poznáme vyše tisíc izotopov odpovedajúcich 102 doteraz známym prvkom, všetky majú svoje pevné miesto v periodickej sústave.

Vzťah štruktúry atómových jadier k periodickému zákonu nie je ešte spoľahlivo objasnený, hoci sa tejto otázke venoval veľký počet prác [13—15, 65, 66, 76, 139, 141, 150, 162, 188, 189, 193, 194, 219, 230, 235—238, 250, 251, 277, 278, 286, 288, 309, 313, 320, 322, 337, 365, 392, 394—396]. Mnohé fyzikálne vlastnosti a vzťahy, ktoré závisia od atómového jadra (atómová váha, Moseleyov zákon), majú monotónny priebeh. Naproti tomu usporiadanie elektrónov okolo atómového jadra je vyslovene periodické.

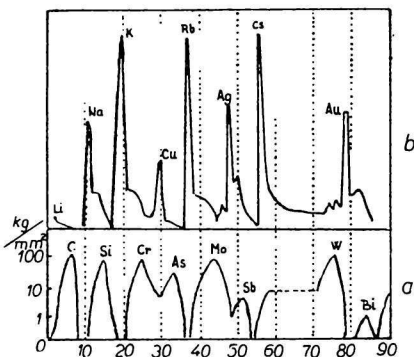
Rovnako aj výskyt chemických prvkov v prírode, bezprostredne súvisiaci s vlastnosťami atómových jadier, poukazuje na zložitú periodičnosť, v ktorej možno odhaliť niektoré zákonitosti. Napríklad všetky v prírode najrozšírenejšie prvky majú nízke atómové váhy (D. I. Mendelejev). Rozptýlené prvky majú nepárne atómové čísla a patria všetky do nepárnych skupín periodickej sústavy (V. I. Vernadskij).



Obr. 1. Teploty topenia a teploty varu prvkov ako funkcia atómového čísla [222].

Periodický priebeh je charakteristický pre tie fyzikálne vlastnosti prvkov, ktoré viac alebo menej súvisia s elektrónovou štruktúrou atómov, ako je napr. teplota topenia (obr. 1) [37, 48, 94, 180, 181, 222, 258, 332, 348, 382], teplota varu (obr. 1) [94, 180, 181, 222, 332], kritická teplota [30], sublimačné teplo [180, 181, 332], atómové teplo [182, 183, 186], atómový objem [48, 93, 94, 214, 222, 348, 382], hustota [94, 185], tvrdosť [94], koeficient lineárnej rozťažnosti [48, 348, 382], koeficient stlačiteľnosti [48, 348], mechanické vlastnosti (obr. 2a, medza pevnosti  $\text{kg/mm}^2$ ) [117, 118, 259], atómová elektrická vodivosť (obr. 2b) [94, 382] a i. Doteraz bolo viac alebo menej podrobne preskúmaných vyše 100 takýchto vlastností. V niektorých prípadoch je periodičnosť veľmi zložitá, predovšetkým preto, lebo posudzovaná vlastnosť sama závisí od viacerých prvotných súčasne sa uplatňujúcich charakteristík a vedľajších vplyvov (periodičnosť v elektrónovej štruktúre atómov, typ chemickej väzby, kryštalová štruktúra, polymorfne modifikácie, tepelná rozťažnosť a pod.). Nie každá vlastnosť je preto vhodná ako základ pre posudzovanie periodičnosti ostatných vlastností alebo ako kritérium pre usporiadanie prvkov v perio-

dickej sústave. Všeobecným nedostatkom usporiadania prvkov do podskupín podľa fyzikálnych vlastností je to, že pre rozličné vlastnosti môžeme dostať rozdielne varianty tabuľky. Napríklad podľa spektrálnych vlastností vodík je analogický alkalickým kovom a hélium kovom alkalických zemín. Takáto tabuľka by však bola oprávnená len vtedy, ak by sa používala výlučne pri spektroskopických štúdiách chemických prvkov. Naproti tomu umiestenie hélia nad berýliom v periodickej tabuľke, ktorá berie zreteľ nie na spektrálne, ale na hocaké iné vlastnosti, je nesprávne.



Obr. 2. *a* — Medza pevnosti [118], *b* — atómová elektrická vodivosť prvkov [382] ako funkcia atómového čísla.

Aby periodická tabuľka vystihovala čo najvšeobecnejšie zákonitosti, aby z nej bolo možné vyvodzovať čo najviac vzťahov, treba pri jej zostavovaní brať do úvahy tie najpodstatnejšie vlastnosti prvkov. Mendelejev za takéto vlastnosti považoval atómové váhy prvkov a ich stechiometrické mocnosti. Toto však nie sú jediné možné kritériá, a tak priebehom vývoja vzniklo doteraz asi 200 variantov periodickej sústavy, ktoré viac alebo menej dokonale vystihujú jednotlivé stránky periodickeho zákona. Preto periodickú tabuľku, periodickú sústavu nesmieme stotožňovať s periodickým zákonom samotným. Periodický zákon je pojem oveľa širší, základný, a periodická sústava je iba názorným vyjadrením niektorých jeho stránok.

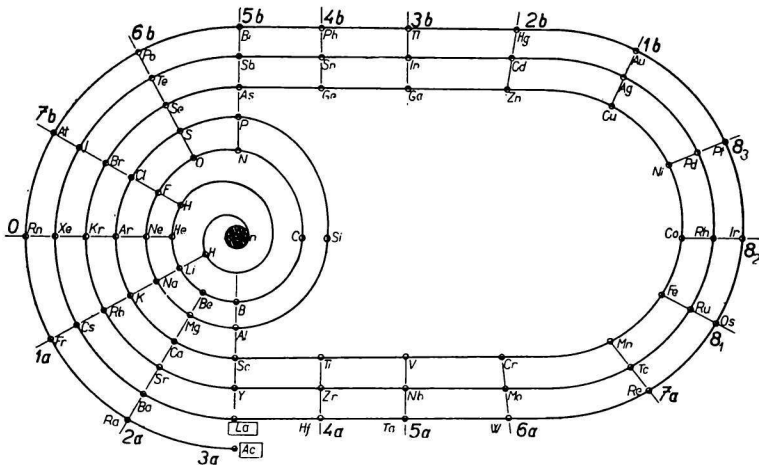
Výstižne to vyjadril už B. B r a u n e r [50], keď napísal: „Hocako geniálne je zostavenie prvkov do prehľadnej tabuľky známej pod menom „periodická sústava prvkov“, predsa treba zdôrazniť, že v samej tejto tabuľke nie je veľkosť Mendelejevových ideí. Podobné tabuľky zostavilo vo forme viac alebo (a to najmä) menej dokonalej už pred Mendelejevom niekoľko chemikov, a prioritá samej, a k tomu ešte nedokonalaj tabuľky, prináleží teda im. Avšak veľkosť a hĺbka Mendelejevových ideí je v tom, čo do tejto svojej sústavy vložil, v jej prírodno-filozofickom význame, v tom, čo táto tabuľka hovorí.“

Pri posudzovaní jednotlivých variantov periodickej sústavy treba preto prizerať na to, či sa pri jej zostavovaní brali do úvahy skutočne najpodstatnejšie kritériá, či sústava skutočne vystihuje zmysel periodickeho zákona, alebo či sa pri jej zostavovaní postupovalo len formalisticky [391].

Prítom treba predovšetkým: 1. zvoliť pre zostavenie sústavy rozhodujúce kritérium a podriaďiť mu rozmiestenie všetkých prvkov; 2. zvoliť formu sústavy: krátka alebo dlhá tabuľka, [248, 307, 308, 376, 377, 380, 381], úprava Thomsen—Bohrovej sústavy

[9, 71, 105, 148, 353, 354], sústava tvaru krivky (špirála, lemniskata), [4, 68, 98, 130, 275, 388], trojrozmerná sústava [135, 234, 260, 287, 300, 325].

Ako sa zdá, spočiatku sa pri úpravách pôvodnej Mendelejevej tabuľkovej formy periodickej sústavy sústredil záujem upravovateľov predovšetkým na vynájdenie odlišného grafického zobrazenia sústavy. Popri rozličných variantoch tabuliek vzniklo veľa krivkových periodických sústav, často veľmi zložitých (napr. [144]). Pri priestorových krivkách išlo väčšinou o rozličné závitnice, ktoré boli obdobou de Chancourtoisovej



Obr. 3. Periodická sústava prvkov podľa S. I. Tomkeieffa [357].

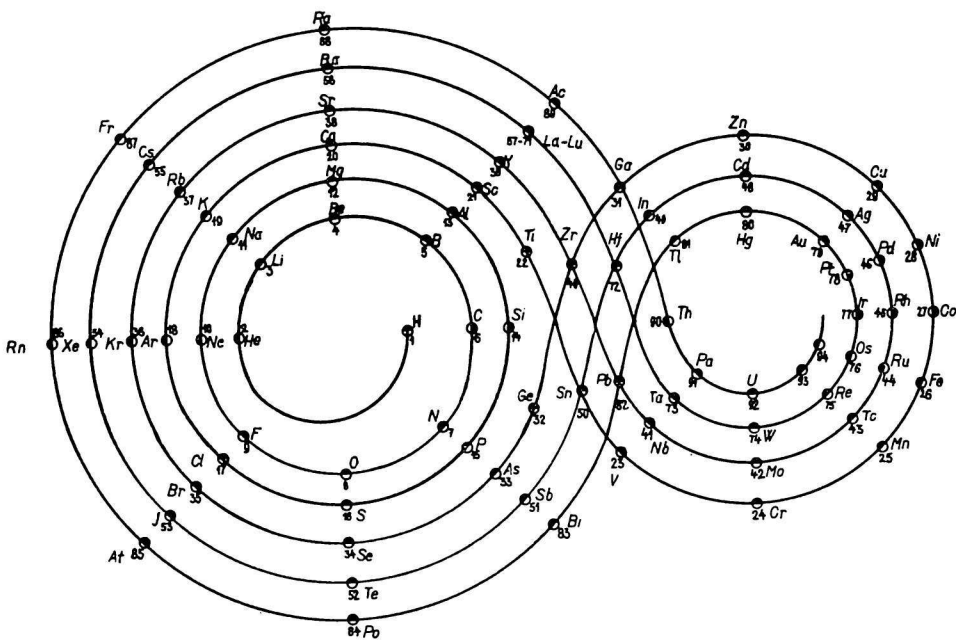
„telurickej skrutky“, pričom rôzna veľkosť závitov, prípadne ich vyčlenenie mali vyjadrovať nerovnakú dĺžku periód, lantanidy a pod. Nechýbali však ani rozličné sústavy pripomínajúce telesá, ako bola „kubická“ sústava van den Broekova. Pri konštrukcii nových periodických sústav sa spočiatku postupovalo väčšinou rýdzo empiricky, bez ďalšieho rozvíjania podstaty periodického zákona. Tým si možno vysvetliť aj veľkú pestrosť v ich grafickej úprave (okolo 200 úprav periodickej sústavy možno zatriediť do približne 35 typov) [16, 17, 22,—26, 32, 33, 54, 62, 64, 67, 70, 72, 84, 96 97, 103, 104, 112, 113, 119,—123, 129, 138, 153, 167, 168, 170, 173, 187, 190, 191, 192, 200, 201, 216, 218, 231, 232, 244, 253, 254, 256, 261, 262, 265—268, 274, 294—297, 299, 301 302, 304, 306, 310, 315, 317—319, 324, 326, 327, 346, 350, 351, 356, 366, 367, 370, 372, 378, 379, 381, 382, 384, 385, 393].

Za prirodzené usporiadanie, odpovedajúce priebehu periodicnosti, možno považovať usporiadanie prvkov v poradí stúpajúcich atómových váh na trojrozmernej krivke (napr. na závitnici alebo priestorovej lemniskate opisanej na obvodě valca alebo kužela). Z tohto zobrazenia môžeme ďalšie dve základné úpravy odvodiť premietnutím [200]: jeho pôdorysom je špirála alebo lemniskata, jeho rozvinutým bokorysom obvyklá tabuľka (dlhá, prípadne po úprave krátka; sú súvislými, prípadne prerušenými malými periódami v závislosti od miesta rozvinutia priestorového variantu sústavy).

Krivkových úprav periodickej sústavy je v literatúre uvedený veľký počet [200]. Jednu z nových špirálových úprav periodickej sústavy zostrojil S. I. Tomkeieff [137, 356—360] (obr. 3). Špirála sa začína neutrónom ako prvkom s atómovým číslom 0 a pre-

chádza postupne všetkými prvkami až po aktíniium. Lantanidy a aktinidy sú umiestené na mieste lantánu a aktínia. Prechodné kovy sú usporiadané na pretiahnutej časti špirály, aby sa zdôraznila ich odlišnosť. Na tejto úprave možno pomocou obvyklých kartografických metód zostaviť „mapy“ ohraničujúce prvky s rovnakými vlastnosťami (tvrdosť, magnetickú susceptibilitu a i.).

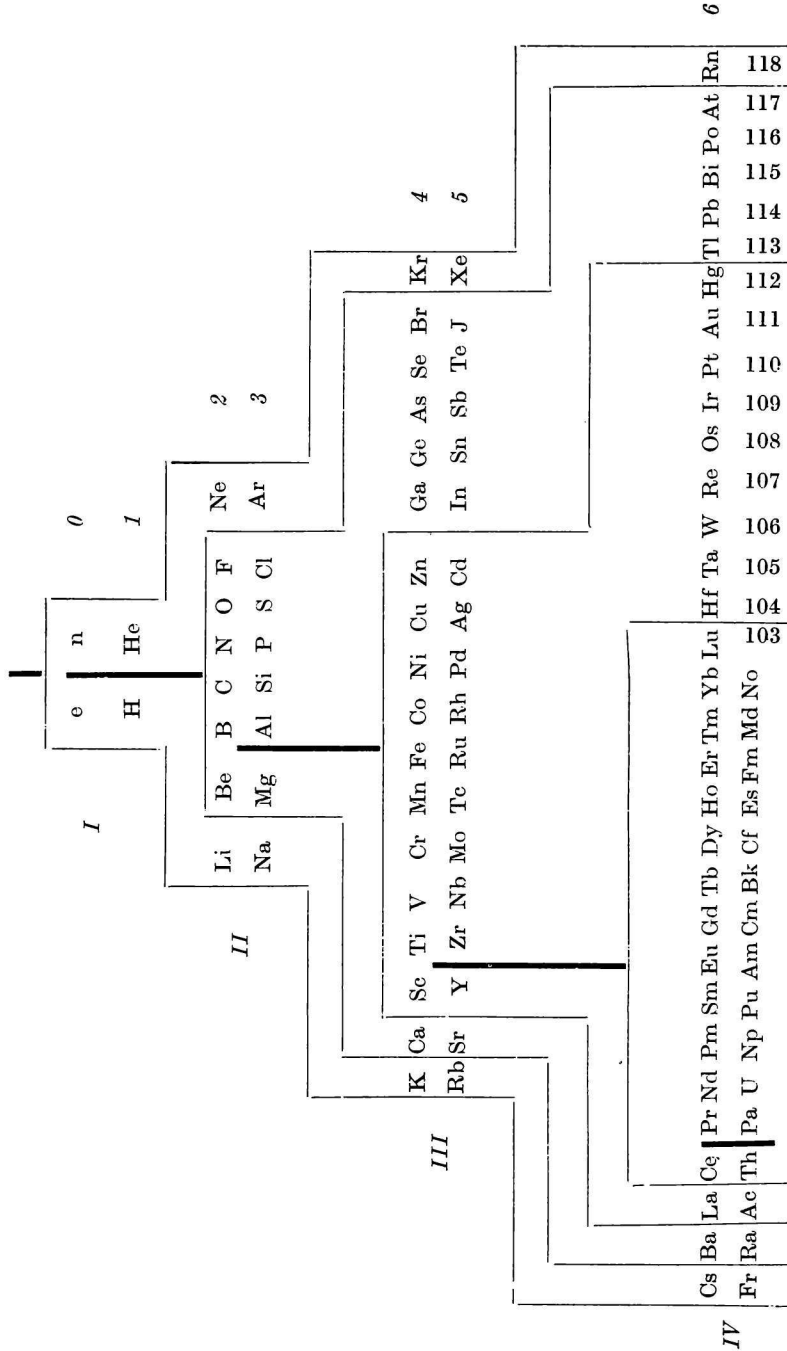
Iným príkladom úpravy periodickej sústavy v podobe krivky je lemniskata, ktorú navrhol F. Kipp [162] (obr. 4). Aj v tejto úprave sú prechodné kovy osamostatnené. Inertné plyny sú vhodne umiestené medzi skupinou alkalických kovov a skupinou halogénov. Rovnako aj postavenie uhlíka a kremíka je v dobrom súhlase s ich chemickými vlastnosťami. Kyselinotvorné prechodné kovy (V, Cr, Mn atď.) sú usporiadané na tej istej polovici lemniskaty ako halogény a chalkogény, naproti tomu ťažké kovy s prevažne zásaditými vlastnosťami sú zoskupené v oblasti, kde sú aj alkalické kovy a kovy alkalických zemin. Kippova lemniskata dobre vystihuje i ostatné chemické vzťahy medzi prvkami.



Obr. 4. Periodická sústava prvkov podľa F. Kippa [162].

Pretože však chemické vlastnosti prvkov sú určené elektrónovou štruktúrou ich atómov, je potrebné, aby periodická sústava vystihovala aj túto vlastnosť, čím sa jej upotrebitelnosť podstatne rozšíri. Túto podmienku veľmi výstižne splňuje periodická sústava, ktorú navrhol N. B o h r [41] na základe analógie v elektrónových štruktúrach neutrálnych atómov. Bohrovu úpravu periodickej sústavy zdokonalil J. I. A c h u m o v [2, 3] tým, že ju rozdelil na dvojice periód (diády), pričom obidve periódy tej istej diády obsahujú rovnaký počet prvkov. Do prvej diády včlenil nultú periódu, obsadenú elektrónom ako analógom vodíka a neutrónom ako analógom inertných plynov [203]. Každému prvku

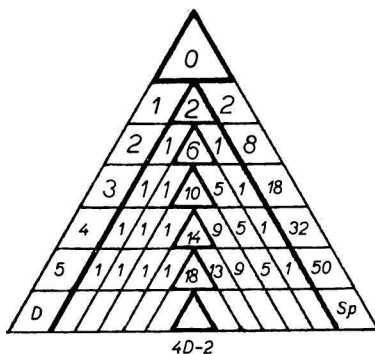
Tabuľka 4



I—IV diády 0—7 periódy

v hornej perióde diády odpovedá analogický prvok v dolnej perióde tej istej diády. Každá perióda sa začína alkalickým kovom a končí sa inertným plynom (tab. 4).

Jednotlivé diády možno považovať za akési samostatné sústavy so svojimi zákonitostami a zvláštnosťami. Spôsobené je to tým, že sa do nich postupne včleňujú po 2 prvky (I. diáda), potom postupne po 6, 10 a 14 prvkov (v súhlase s maximálnym počtom elektrónov v orbitoch *s*, *p*, *d*, *f* pri postupnej výstavbe elektrónového obalu atómu s narastaním atómového čísla). Takúto štruktúru periodickej sústavy možno znázorniť tabuľkou (tab. 4) a trojuholníkovým grafom (obr. 5). V tomto trojuholníku štruktúry periodickej sústavy



Obr. 5. Štruktúra periodickej sústavy prvkov podľa J. I. Achumova [3].

je v prostredných trojuholníkoch uvedený počet prvkov včlenených do vsuviek v jednotlivých diádach. Ostatné číslce udávajú počet prvkov v periódach pred vsuvkou a po nej.

K podobným záverom došiel aj A. F. Kapustinskij [149]. Pre dosiahnutie súhlasu klasifikácie chemických prvkov s klasifikáciou atómov tak isto zaviedol nultú periódu obsadenú elektrónom a neutrónom. V súhlase s poznatkom o sekundárnej periodičnosti zaviedol predstavu o cykloch (obdoba diád). Jeho úprava Bohrovej tabuľky je analogická ako úprava Achumovova, s tým rozdielom, že navzájom pospájal spojitémi, prípadne prerušovanými čiarami tie prvky v periódach nasledujúcich za sebou, ktoré majú analogické vlastnosti. Ďalším zlepšením tohto variantu je úprava B. V. Nekrasova [223], ktorý tým, že pri spájaní analogických prvkov graficky vyjadril, či ide o úplnú alebo neúplnú analógiu, lepšie vystihol chemické vlastnosti prvkov. V prípade neúplnej analógie sa ešte rozlišuje medzi analógiou v charakteristických mocenstvách a v mocenstvách iných, než sú charakteristické. Ostatné varianty sú len obmenou hlavných týchto typov [9].

Štruktúru periodickej sústavy zobrazil A. F. Kapustinskij priestorovým modelom (obr. 6a), kde jednotlivé roviny symbolizujú cykly. Každá z nich je rozdelená na dve zrkadlovo súmerné polovice, odpovedajúce párnym a nepárnym periódam. Klasifikácia prvkov v periodickej sústave je uvedená na projekcii tohto priestorového modelu do pôdorysu (obr. 6b).

V súhlase s predstavou o diádach, resp. cykloch možno počet prvkov *S* v každej perióde *n* vyjadriť vzorcom

$$S = 2(n_1 + n_2)^2,$$

ktorým sa spresňuje [2, 3, 36, 60, 146, 166, 195—197, 355, 361, 362] pôvodný Rydbergov vzorec [271, 272]:

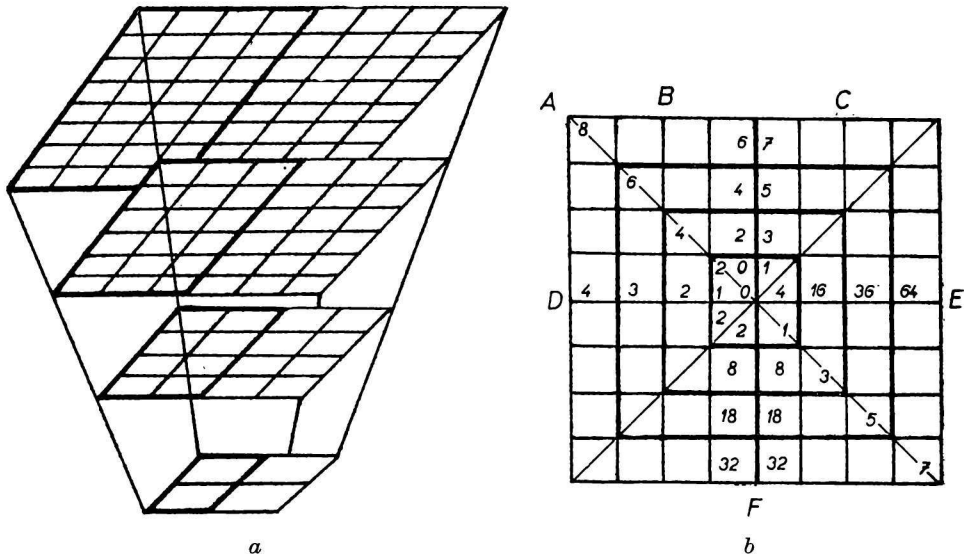
$$S = 2n^2$$



Krátku formu periodickej tabuľky, ktorá je v súhlase so spomenutými predstavami o štruktúre periodickej sústavy, zobrazuje tab. 5 [149]. V tejto tabuľke sú lantanidy a aktinidy vyčlenené pod tabuľku.

Periodických tabuliek, ktoré sa usilujú vystihnúť elektrónovú štruktúru prvkov, je veľký počet. Majú jednak krátku, jednak dlhú formu. Prehľadnejšie sú dlhé úpravy periodickej tabuľky, v ktorých však, ako sme už spomenuli, nevynikajú neúplné analógie [7, 8, 69, 85, 101, 198, 202, 215, 220, 223, 255, 298, 299, 330, 331—333, 375].

Názornosť tabuliek možno ešte zvýšiť, ak sa výstavba elektrónových štruktúr atómov vyjadri priestorove.



Obr. 6. a) Priestorové zobrazenie periodickej sústavy prvkov podľa A. F. Kapustinského [149]; b) projekcia priestorového zobrazenia periodickej sústavy prvkov na základňu; A. skupiny, B. párne periódy, C. nepárne periódy, D. cykly, E. počet prvkov v cykle, F. počet prvkov v perióde.

V tabuľke podľa Z. G. S z a b ó a [332] (obr. 7) jednotlivé riadky neoznačujú periódy, ale každý riadok zobrazuje zaplnenie jednej vrstvy elektrónového obalu o určitom hlavnom kvantovom čísle. V tabuľke názorne vidieť postupnú zmenu vlastností prvkov, čo umožňuje ich prirodzené rozdelenie do siedmich skupín (navzájom stupňovite oddeľných): 1. inertné plyny, 2. nekovy, 3. polokovy, 4. metakovy, 5. alkalické kovy a kovy alkalických zemin, 6. prechodné kovy, 7. lantanidy a aktinidy. Berylium a horčík sú v súhlase s chemickými vlastnosťami zaradené nad zinok, čo nie je v rozpore s ich elektrónovou štruktúrou. Vo veľmi dobrom súhlase s touto analógiou sú aj fyzikálne vlastnosti spomenutých prvkov.

Odlíšnym spôsobom vyjadril vzťah medzi elektrónovou štruktúrou atómov a umiestnením prvkov v dlhej forme periodickej tabuľky A. N. W r i g l e y a spolupracovníci [383] (obr. 8). Jednotlivé vrstvy v elektrónovom obale atómov znázornené sú postupne stále vyššími stupňami, takže v tabuľke veľmi názorne vidieť elektrónovú štruktúru každého prvku i priebeh zaplnenia elektrónových vrstiev pri postupnom zväčšovaní atómového čísla prvkov [249].

Tabulka 5

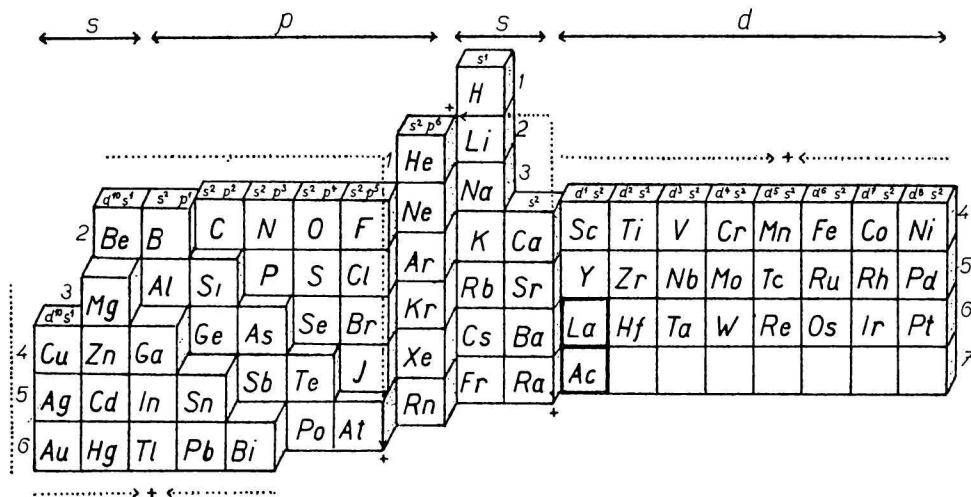
Cyklyns	Periódá	Rad	Skupina										
			1	2	3	4	5	6	7	8	0		
1	0		e										
	1	I	H										
2	2	II	Li	Be	B	C	N	O	F				
	3	III	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl				
	4	IV	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	
3	5	V	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br				Kr
	6	VI	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	
	7	VII	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	J				Xe
	8	VIII	Cs	Ba	La*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	
4	9	IX	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At				Rn
	10	X	Fr	Ra	Ac**								
	11	XI											ElkaRn

\*Lantanidy

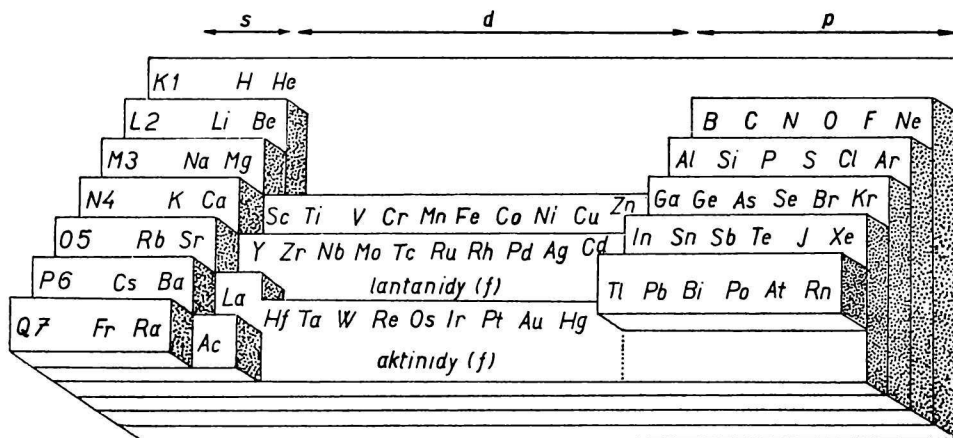
\*\*Aktinidy

Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	103

Z naznačeného vývinu názorov na periodický zákon a z rozvoja úprav periodickej sústavy vidieť, že periodická tabuľka sa právom nepovažuje len za púhy zoznam prvkov usporiadaných v poradí stúpajúcich atómových čísel podľa niektorých fyzikálnych a chemických vlastností, ale že je vyjadrením hlbokých prírodných zákonitostí.



Obr. 7. Periodická sústava prvkov podľa Z. G. Szabóa a B. Lakatosa [332].



Obr. 8. Periodická sústava prvkov podľa A. N. Wrigleya [383].

Celý vývoj poznatkov o periodickom zákone od začiatočného empirického zovšeobecňovania faktov až po dnešnú ustavičnú syntézu najnovších chemických a fyzikálnych poznatkov, z ktorých sa rodí aj stále hlbšie a presnejšie zobrazenie periodickej sústavy, nás presvedčuje, že význam periodického zákona bude ešte dlho rásť a že možnosti, ktoré sú v ňom skryté, ešte zďaleka nie sú vyčerpané. Tým, že periodický zákon vniesol vonkajší poriadok do zdanlivo nezávislého samostatného jestvovania chemických prvkov, pričom

súčasne odhalil aj ich vnútornú spojitosť; dal ľudstvu do rúk nielen nesmierne zdroje energie, ale mocne pôsobil aj pri rozvíjaní a upevňovaní materialistického svetonázoru [4, 86, 87, 140a, 153, 157—159, 161, 165, 204, 245, 247, 392]. Stal sa tak trvalou zbraňou bádateľov v oblasti chémie a fyziky, ktorá ustavične rozširuje naše možnosti poznávania prírody.

## LITERATÚRA

1. A c e r a L. H., *Met. y elec.* 15, No. 164, 36 (1951). — 2. A c h u m o v J. I., *Ž. obšč. chim.* 16, 961 (1946). — 3. *idem, ibid.* 17, 1241 (1947). — 4. A g a f o š i n N. P., *ibid.* 22, 177 (1952). — 5. A g e j e v N. V., *Izv. Sektora fiz.-chim. analiza* 19, 97 (1949). — 6. A g u e e v N. V., *Changements de phases*, Paris 1952, 287—290. — 7. A l b a n s k i j V. L., *Dokl. Akad. nauk SSSR* 75, 209 (1950). — 8. *idem, Ž. obšč. chim.* 21, 1393 (1951). — 9. A n t r o p o f f A., *Z. angew. Chem.* 39, 722 (1926). — 10. A r i j a S. M., *Ž. obšč. chim.* 27, 1405 (1957).
11. A r i j a S. M., V o l f E., G r o s s m a n n G., *Ž. obšč. chim.* 26, 2102 (1956). — 12. A s t a c h o v K. V., *Uspechi chim.* 17, 578 (1948). — 13. A s u n m a a S. K., L e p s i u s R., *Naturwiss.* 42, 208 (1955). — 14. *idem, ibid.* 43, 154 (1956). — 15. *idem, ibid.* 43, 324 (1956). — 16. B a b o r J. A., *J. Chem. Educ.* 21, 25 (1944). — 17. B a c a, M e n d o z a, *Bol. Soc. quim. Peru* 21, 5 (1955). — 18. B a c a n o v S. S., *Ž. neorg. chim.* 3, 241 (1958). — 19. B a j k o v A. A., *75 let periodičeskogo zakona D. I. Mendelejeva i Ruskogo chimičeskogo občestva*, Moskva 1947, 11—30. — 20. B a l a r e v D., *Godišnik na Sofijskij univ.* 46, 159 (1949—1950).
21. B a l a r e v D., *Z. anorg. Chem.* 121, 22 (1922). — 22. B a u m h a u e r H., *Die Beziehungen zwischen dem Atomgewichte und der Natur der chemischen Elemente*, Braunschweig 1870. — 23. B a u r E., *Z. physik. Chem.* 76, 569 (1911). — 24. B a y l e y T., *Phil. Mag.* 13, 26 (1882). — 25. *idem, J. Am. Chem. Soc.* 20, 927 (1898). — 26. *idem, Chem. News* 77, 157 (1898). — 27. B e r g O., *Siemens-Z.* 6, 188 (1926). — 28. B e r g m a n A. G., B y č k o v a N. A., *Ž. obšč. chim.* 25, 1041 (1955). — 29. B e r k e n h e i m A., *Z. physik. Chem.* 136, 231 (1928). — 30. B i l t z W., *Z. Elektrochem.* 28, 65 (1932).
31. B i r o n J. V., *Ž. Rus. fiz.-chim. občestva* 47, 964 (1915). — 32. B l o c h M. A., *Typy Mendelejevskich tablic*, Leningrad 1934. — 33. *idem, Obzor form periodičeskoj sistemy*, Leningrad 1934. — 34. B l o k N. I., *Trudy Komisii po analitičeskoj chimii III (VI)*, 5 (1951). — 35. *idem, Kačestvennyj chimičeskij analiz*, Moskva 1952, 19—43. — 36. B o č v a r A. A., *Ž. fiz. chim.* 26, 1059 (1952). — 37. B o č v a r A. A., K u z n e c o v G. M., *Dokl. Akad. nauk SSSR* 98, 227 (1954). — 38. B o e v e r A., *Rev. techn. Luxembourg* 49, 129 (1957). — 39. B o h r N., *Z. Physik* 9, 1 (1922). — 40. *idem, Phil. Mag.* 43, 1070 (1922).
41. B o h r N., *Drei Aufsätze über Spektren und Atombau*, Braunschweig 1922, 132. — 42. B o k i j G. B., *Priroda*, No. 1—2, 38 (1942). — 43. *idem, Vestnik Mosk. univ.*, No. 5, 97 (1948). — 44. *idem, Dokl. Akad. nauk SSSR* 89, 459 (1953). — 45. *idem, Vvedenije v kristallochimiju*, Moskva 1954, 242—256. — 46. B o l í v a r J. I., *Ciencia (Mex.)* 6, 157 (1945). — 47. B o l í v a r J. I., B u e a y — K e l l e r, M a d r a z o, *Ciencia e. invest.* 13, 70 (1957). — 48. *Boľšaja sovetskaja enciklopedija*, II. vyd. (1950), tom 3, 394—395, 396, 410—412. — 49. *ibid.*, II. vyd. (1955), tom 32, 484—495. — 50. B r a u n e r B., *Dopisy Dimitrije I. Mendělejeva českému chemiku B. Braunerovi*, Praha 1952, 17—70.
51. B r a u n e r B., *Collection Czechosl. Chem. Communs.* 2, 219 (1930). — 52. B r a u n e r B., Š v a g r E., *Rozpravy II. tř. České akad. věd* 41, 1 (1931). — 53. *idem, Collection Czechosl. Chem. Communs.* 4, 49, 239 (1932). — 54. v a n d e n B r o e k A., *Fysik.*

Z. 12, 490 (1911). — 55. Carnelley T., Ber. 17, 2287 (1884). — 56. Cartledge G. H., J. Am. Chem. Soc. 50, 2855 (1928). — 57. *idem*, *ibid.* 50, 2863 (1928). — 58. *idem*, *ibid.* 52, 3076 (1930). — 59. Carrière E., Guiter H., Bull. soc. chim. France 1943, 259. — 60. Catalan M. A., Rohrlieh F., Shenstone A. G., Proc. Roy. Soc. 221 A, 421 (1954).

61. Centnerszwer M., Ber. 59 B, 786 (1916—1917). — 62. Cerasoli E., Chim. Ind. Agric., Biol., Realizar Corp. 17, 37 (1941). — 63. de Chancourtois A. E. B., *Vis tellurique: classement naturel des corps simples ou radicaux obtenu au moyen d'un système de classification hélicoïdal et numérique*, Paris 1863. — 64. Chaverri G. R., J. Chem. Educ. 30, 632 (1953). — 65. Chlopin V. G., 75 let periodičeskogo zakona D. I. Mendelejeva i Russkogo chimičeskogo občestva, Moskva 1947, 57—96. — 66. *idem*, Ž. obšč. chim. 11, 1049 (1941); *Izbrannyye trudy I*, Moskva 1957, 348—370. — 67. Clark C. H. D., Proc. Leeds phil. lit. Soc., Sci. Sect. 2, 336 (1932). — 68. Clark J. D., J. Chem. Educ. 10, 675 (1933); *Science* 111, 661 (1950). — 69. Clauson J. E., J. Chem. Educ. 29, 250 (1952); 31, 550 (1954). — 70. Corbino O. M., Riv. nuovo Cimento [N. S.] 5, 57 (1928).

71. Coryell Ch. D., J. Chem. Educ. 29, 62 (1952). — 72. Cotton M. A., Compt. rend. 221, 441 (1945). — 73. Cunningham B. B., Thompson S. G., Angew. Chem. 70, 414 (1958). — 74. Czakis M., Wilmańska A., Wiad. Chem. 10, 101 (1955). — 75. Čeleda J., *Konferencia o anorganickéj chemii*, Smolenice 1955, 146—150. — 76. Čepeleveckij M. L., Ž. exp. teor. fiz. 23, 327 (1952). — 77. Čerňajev I. I., Vestnik Leningr. univ., Serija fiz., chim., No. 22, vyp. 4, 158 (1957). — 78. Čugajev L. A., *Periodičeskaja sistema chimičeskich elementov*, Leningrad 1923. — 79. Dibrova A. A., Izv. Akad. nauk SSSR, Serija fiz. 19, 10 (1955). — 80. *idem*, Ž. fiz. chim. 28, 976 (1954).

81. Diogenov G. G., Dokl. Akad. nauk SSSR 78, 899 (1951). — 82. *idem*, *Chimija v škole 1954*, No. 3, 17. — 83. *Dopisy Dimitrije I. Mendělejeva českému chemiku B. Braunerovi*, Praha 1952, 71 n. (prilohy). — 84. Ebel R. L., J. Chem. Educ. 15, 575 (1938). — 85. Faustov A. P., Ž. obšč. chim. 19, 396 (1949). — 86. *idem*, *Voprosy filosofii 1955*, No. 2, 168. — 87. *idem*, *Dialektičeskij materializm i sovremennoje jestestvoznanije*, Moskva 1957, 163—183. — 88. Fersman A. J., Dokl. Akad. nauk SSSR A 1932, No. 11, 261. — 89. *idem*, *ibid.* 3, 173 (1935). — 90. *idem*, 75 let periodičeskogo zakona D. I. Mendelejeva i Russkogo chimičeskogo občestva, Moskva 1947, 49—56.

91. Fersman A. J., *Zanimatel'naja geochimija*, Leningrad 1954, 49—63. — 92. *idem*, *Izbrannyye trudy II*, Moskva 1953, 377—400. — 93. *idem*, *ibid.*, III, Moskva 1955, 58—64, 356—371. — 94. *idem*, *ibid.*, IV, Moskva 1958, 23—104, 111, 126—137, 146, 158, 175, 207, 221, 231, 253, 268, 313—315, 322, 350—351, 384, 397, 403, 440—477, 484—485, 488, 517. — 95. Figurovskij N. A., *Voprosy istorii jestestvoznanija i tehniki 3*, Moskva 1957, 3—13. — 96. Finke W., Z. Physik 121, 586 (1943). — 97. *idem*, *ibid.* 122, 230 (1944). — 98. Foster L. S., J. Chem. Educ. 26, 283 (1949). — 99. Frers J. N., Z. anorg. Chem. 240, 1 (1938). — 100. *idem*, *ibid.* 249, 281 (1942).

101. Gallais F., *Chimie minérale théorique et expérimentale (Chimie électronique)*, Paris 1950, 119—127. — 102. Gapon J. N., Dokl. Akad. nauk SSSR 58, 823 (1947). — 103. Gardner R., Trans. Proc. New Zealand Inst. 60, 31 (1929). — 104. *idem*, *Nature* 125, 146 (1930). — 105. Gažo J., Sov. věda — chemie 4, 484 (1954). — 106. Gibson D. T., Chem. Ind. 1948, 11. — 107. Glockler G., Popov A. I., J. Chem. Educ. 28, 212 (1951). — 108. Goldanskij V. I., *Novyje elementy v periodičeskoj sisteme D. I. Mendelejeva*, Moskva 1955. — 109. Goldschmidt V. M., *Trudy jubilejnogo Mende-*

*lejevskogo sjezda II*, Moskva 1937, 387—396 (nem.), 397—404 (rus.). — 110. Golik A. Z., *Dopovidi Akad. nauk URSSR 1955*, 352.

111. Golik A. Z., *Ukrajn. chim. ž.* 23, 139 (1957). — 112. Gretschesel H., *Bornemann G.*, *Jahrb. der Erfindungen* 19, 292 (1883). — 113. Grimm H. G., *Z. angew. Chem.* 47, 53, 594 (1934). — 114. Grinberg A. A., *Úvod do chemie komplexních sloučenin*, Praha 1954, 353—380. — 115. Grinberg A. A., Jacimirskij K. B., *Izv. Akad. nauk SSSR, otd. chim. nauk 1952*, 211. — 116. Grjébine T., *Bull. soc. chim. France 1948*, 473. — 117. Gulajev B. B., *Dokl. Akad. nauk SSSR 75*, 25 (1950). — 118. *idem, ibid.* 70, 797 (1950). — 119. Hackh I. W. D., *Das synthetische System der Atome*, Hamburg 1915. — 120. *idem*, *Astrophys. J.* 48, 241 (1918).

121. Hackh I. W. D., *Am. J. Sci.* 46, 481 (1918). — 122. *idem*, *J. Am. Chem. Soc.* 40, 1023 (1918). — 123. Haenzel G., *Z. Physik* 120, 283 (1943). — 124. Hahn O., *Z. angew. Chem.* 42, 924 (1929). — 125. Haisinski M., *J. Chem. Soc. 1949* (Suppl. Issue, No. 2), S. 241. — 126. *idem*, *Bull. soc. chim. France 1949*, 669. — 127. *idem*, *Experientia* 9, 117 (1953). — 128. Hakala R. W., *J. Phys. Chem.* 56, 178 (1952). — 129. Hansteen J. M., *Fra. Fysikkens, Verden* 13, 230 (1952). — 130. Harkins W. P., Hall R. E., *J. Am. Chem. Soc.* 38, 169, 189 (1916).

131. Hart D., *J. Phys. Chem.* 56, 202 (1952). — 132. Hein F., *Hauptjahrestagung 1954 vom 21.—23. Oktober 1954 in Leipzig*, Berlin 1955, 1—13. — 133. Herdan G., *Nature* 162, 215 (1948). — 134. Hildebrand J. H., *J. Chem. Educ.* 18, 291 (1941). — 135. Horie S., *ibid.* 31, 383 (1954). — 136. Hückel W., *Anorganische Chemie*, Leipzig 1955, 541. — 137. Hurwie J., *Wiad. Chem.* 12, 685 (1957). — 138. Huth E., *Das periodische Gesetz der Atomgewichte*, Frankfurt a. Oder 1886. — 139. Ioffe A. F., *75 let periodičeskogo zakona D. I. Mendelejeva i Russkogo chimičeskogo občestva*, Moskva 1947, 97—114. — 140. Ionescu M., *Studii si cercetări chim. Acad. R. P. R. Fil. Cluj.* 7, 7 (1956). — 140a. Ionidi P. P., *Filosofskoje značenije periodičeskogo zakona D. I. Mendelejeva*, Moskva 1958.

141. Ivanenko D., Lapin S., *Dokl. Akad. nauk SSSR* 88, 45 (1953). — 142. Jacimirskij K. B., *Ž. obšč. chim.* 23, 180 (1953). — 143. Janek A., *Z. anorg. Chem.* 252, 354 (1944). — 144. Janet C., *Chem. News* 138, 372, 388 (1929). — 145. Kapustinskij A. F., *Izv. Akad. nauk SSSR, otd. chim. nauk 1944*, 99. — 146. *idem*, *Dokl. Akad. nauk SSSR* 80, 365 (1951). — 147. *idem, ibid.* 80, 755 (1951). — 148. *idem, ibid.* 81, 47 (1951). — 149. *idem*, *Izv. Akad. nauk SSSR, otd. chim. nauk 1953*, 3. — 150. *idem, ibid.* 1953, 12. — 150a. *idem*, *Dokl. Akad. nauk SSSR* 67 663 (1949).

151. Kapustinskij A. F., *Ž. obšč. chim.* 25, 2347 (1955). — 152. *idem*, *Izv. Akad. nauk SSSR, otd. chim. nauk 1957*, 129. — 153. Karpovics E., *D. Mendelejevs un kimisko elementu periodiskais likums*, Riga 1957. — 154. Kedrov B. M., *D. I. Mendelejev — Novyje materialy po istorii otkrytija periodičeskogo zakona*, Moskva 1950, 87—145. — 155. *idem*, *Chimija v škole 1952*, 18. — 156. *idem*, *Uspechi fiz. nauk* 47, 95 (1952). — 157. *idem*, *Voprosy filosofii 1952*, No. 2, 112. — 158. *idem*, *Uspechi chim.* 21, 699 (1952). — 159. *idem*, *Voprosy filosofii 1953*, No. 5, 53. — 160. *idem, D. I. Mendelejev — Naučnyj archiv I. Periodičeskij zakon*, Moskva 1953, 771—858.

161. Kedrov B. M., *Voprosy filosofii 1957*, No. 3, 19—34. — 162. Kipp F., *Naturwiss.* 30, 679 (1942). — 163. Kirchhoff F., *Z. physik. Chem* 44, 257 (1920). — 164. Kirejev V. A., *Ž. fiz. chim.* 20, 339 (1946). — 165. Klaus G., *Chem. Techn.* 6, 631 (1954). — 166. Klečkovskij V. M., *Ž. fiz. chim.* 27, 1251 (1953). — 167. Klemm W., *Z. anorg. allgem. Chem.* 184, 345 (1929). — 168. Klikorka J., *Sborník přednášek zo sjazdu chemikov v Banskej Štiavnici 1953. II. Sekcia anorganická*, Bratislava 1954, 213—224. — 169. Konovalev L. P., *Periodičeskaja sistema D. I. Mendelejeva i novaja*

*chimija*, Leningrad 1929. — 170. K o p p e l I., *Der Bau der Atome und das periodische System*, Leipzig 1927.

171. K o r n i l o v I. I., Dokl. Akad. nauk SSSR 114, 106 (1957). — 172. *idem*, Izv. Akad. nauk SSSR, otd. chim. nauk 1950, 475. — 173. K r a u d e l a t W. G., Anais assoc. quim. Brasil. 8, 125 (1949). — 174. K ü h n e K., Silikattechnik 6, 190 (1955). — 175. K u r b a t o v V. J., *Zakon Mendelejčva*, Leningrad 1925. — 176. L a k a t o s B., Magyar Kém. Folyóirat 61, 210 (1955). — 177. *idem*, Z. physik. Chem. 206, 41 (1956). — 178. *idem*, Magyar tud. Akad. Kém. tud. oszt. közl. 7, 119 (1956). — 179. *idem*, Acta Chim. Hung. 8, 207 (1955). — 180. L a k a t o s B., K i r á l y D., B a y e r J., Magyar Kém. Folyóirat 62, 119 (1956).

181. L a k a t o s B., K i r á l y D., B a y e r J., Acta Chim. Hung. 17, 125 (1958). — 182. *idem*, Magyar Kém. Folyóirat 63, 124 (1957). — 183. *idem*, Acta Chim. Hung. 17, 151 (1958). — 184. L a z a r e v P. P., Izd. Mosk. aviac. inst. 1935, 1. — 185. L e b e d e v V. I., Dokl. Akad. nauk SSSR 63, 515 (1948). — 186. *idem*, *ibid.* 63, 645 (1948). — 187. L e m a r c h a n d s M., J a c o b M., Bull. soc. chim. France 1, 1070 (1934). — 188. L e p s i u s R., A s u n m a a S. K., Naturwiss. 41, 221 (1954). — 189. L e v i t s k a j a M. A., Dokl. Akad. nauk SSSR 64, 61 (1949). — 190. L u d e r W. F., J. Chem. Educ. 16, 393 (1939).

191. L u d e r W. F., J. Chem. Educ. 20, 21 (1943). — 192. L y o n B., *Das periodische System in neuer Anordnung*, Leipzig 1928 (II. vyd. 1931). — 193. M a j t a k G. P., Ž. obšč. chim. 25, 1829 (1955). — 194. *idem*, *ibid.* 25, 2017 (1955). — 195. M a r s o n L. M., Nature 177, 1179 (1956). — 196. *idem*, Chimica 33, 166 (1957). — 197. M a r s o n L. M., Z u e c c h i U., Atti. Ist. Ven. Sci. Lct. Arti 133, 215 (1955). — 198. M a š e n c e v A. I., Ž. obšč. chim. 24, 1094 (1954). — 199. M a x w e l l J. A., J. Chem. Educ. 27, 510 (1950). — 200. M a z u r s E., Chemiker-Ztg. 80, 195 (1956).

201. M a z z u c c h e l l i A., Gazz. chim. ital. 60, 531 (1930). — 202. M e C u t c h e o n K. B., J. Chem. Educ. 27, 17 (1950). — 203. M e i t n e r L., Naturwiss. 22, 733 (1934). — 204. M e l c e r I., Naša veda 5, 273 (1958). — 205. M e n d e l e j e v D. I., Ž. Rus. chim. občestva 1, 60 (1869); J. prakt. Chem. 106, 251 (1869); Z. Chem. N. F. 5, 404 (1869). — 206. *idem*, Ž. Rus. chim. občestva 2, 14 (1870). — 207. *idem*, Berliner Ber. 3, 990 (1870). — 208. *idem*, *ibid.* 4, 348 (1871). — 209. *idem*, Ž. Rus. chim. občestva 3, 25 (1871). — 210. *idem*, Lieb. Ann. 8 (Suppl.), 133 (1871).

211. M e n d e l e j e v D. I., *Osnovy chimii II*, 8. (13.) vyd., S. Peterburg 1906 (Leningrad 1947), 69—99, 376—400; *Sočiněnija XV: Osnovy chimii (1868—1871)*, Moskva—Leningrad 1949. — 212. M e n š u t k i n B. N., *Periodičeskij zakon*, Moskva 1928. — 213. M e y e r L., *Die modernen Theorien der Chemie*, 1864. — 214. *idem*, Lieb. Ann., Suppl. B, 7, 354 (1870); Ann. Chem. Pharm., Suppl. 7, 354 (1870). — 215. M i l l e r L. E., J. Chem. Educ. 32, 198 (1955). — 216. M o n r o e C. J., Turner W. D.; *ibid.* 3, 1058 (1926). — 217. M o o s e r E., P e a r s o n W. B., Helv. Phys. Acta 30, 222 (1957). — 218. M o r e t t e A., J. pharmac. Chim. 1, 437 (1941). — 219. M o r o z o v J. R., Ž. obšč. chim. 20, 555 (1950). — 220. M u r a š o v G. M., *ibid.* 19, 399 (1949).

221. N a d e i n s k i j B. P., *Vvedenije v analitičeskiju chimiju*, Moskva 1953, 39—53. — 222. N á r a y — S z a b ó I., Acta Chim. Hung. 17, 81 (1958). — 223. N e k r a s o v B. V., *Kurs obščej chimii*, Moskva 1955, 206—227, 835—879. — 224. N e w l a n d s J. A. R., Chem. News 12, 83 (1865). — 225. N i k o l s k i j V. K., Priroda 1934, No. 3, 48. — 226. N o d d a c k W., *Trudy jubilejnogo Mendelejevskogo sjezda II*, Moskva 1937, 53—59 (nem.), 61—67 (rus.). — 227. *idem*, *ibid.* 371—377 (nem.), 379—386 (rus.). — 228. *idem*, Z. angew. Chem. 47, 301—305 (1934). — 229. N o r b e r t — S c h r a n z e r G., Natur-

wiss. 42, 438 (1956). — 230. Novoseiskaja N. A., Dokl. Akad. nauk SSSR 74, 921 (1950).

231. Oddo G., Gazz. chim. ital. 50 II, 213 (1920). — 232. *idem, ibid.* 55, 149 (1925); 61, 694 (1931). — 233. Odling W., Phil. Mag. 1, 423, 480 (1857). — 234. Oppegaard A. G., J. Chem. Soc. 1948, 318. — 235. Ožigov J. P., Ž. obšč. chim. 21, 1931 (1951). — 236. *idem, ibid.* 23, 2 (1953). — 237. *idem, ibid.* 23, 177 (1953). — 238. *idem, ibid.* 25, 1637 (1955). — 239. Pachorukov N. I., Chimija v škole 1954, No. 5, 14. — 240. Paneth F., Naturwiss. 18, 964 (1930).

241. Pauling L., J. Am. Chem. Soc. 69, 542 (1947). — 242. *idem, General Chemistry*, San Francisco 1954. — 243. Pavlov P. N., Trudy Odessk. univ., Sb. Chim. fak. 3, 37 (1953). — 244. Pavolini T., Chimica 33, 7 (1957). — 245. *Periodičeskij zakon D. I. Mendelejeva i jeho filozofskoje značenije*, Moskva 1947. — 246. Petrovici E., Bull. stiint. si tehn. Inst. politehn. Timisoara 1, 335 (1956). — 247. Petrusenko A., Nauk zap. Kievsk. univ. 16, No. 4, 57 (1957). — 248. Pfeiffer P., Naturwiss. 8, 987 (1920). — 249. Pfeiffer P., Schmitz E., Dominik F., Fritzen A., Werdelman B., Z. anorg. allgem. Chem. 264, 188 (1951). — 250. Pokrowsky G., J. Phys. 1932, 150.

251. Ponomarev V. V., Ž. fiz. chim. 31, 2591 (1957). — 252. Prunier F., Bull. soc. chim. France 1947, 771. — 253. Quam G. N., Quam M. B., J. Chem. Educ. 11, 27, 257, 288 (1934). — 254. Rabinovitsch E., Thilo E., *Periodisches System, Geschichte und Theorie*, Stuttgart 1930. — 255. Ramirez—Torrez O., J. Chem. Educ. 32, 450 (1955). — 256. Remy H., *Lehrbuch der anorganischen Chemie I*, Leipzig 1957, 7—31, 150. — 257. *idem, ibid.*, II, Leipzig 1952, 3—10. — 258. Renaud P., Bull. soc. chim. France 12, 1060 (1945). — 259. Riabinin J. N., Dokl. Akad. nauk SSSR 104, 721 (1955). — 260. Rice W. E., J. Chem. Educ. 33, 492 (1956).

261. Risavi I., Gazz. mat. si fiz. 37, 227 (1956). — 262. Roger P., Inform. scient. 12, 125 (1957). — 263. Roginskij S. Z., Uspechi chim. 20, 270 (1951). — 264. *idem, Mendělejevova periodická soustava prvků ve světle posledních výzkumů*, Praha 1954. — 265. Rolla L., Piccardi G., Gazz. chim. ital. 56, 512 (1926). — 266. *idem, Phil. Mag.* 7, 286 (1929). — 267. Romanoff V., Compt. rend. 17. Congr. Chim. Ind. (Paris) II, 2059 (1937). — 268. Rudorf G., *Das periodische System*, Leipzig 1904. — 269. Rutherford E., J. Chem. Soc. 1934, 635. — 270. *idem, Trudy jubilejnogo Mendelejevskogo sjezda II*, Moskva 1937, 329—340 (angl.), 341—353 (rus.).

271. Rydberg J. R., Lunds Univ. Arsskr. [N. S.] 9 (No. 18), 1 (1913). — 272. *idem, J. chim. phys.* 12, 585 (1914). — 273. Sanderson R. T., J. Am. Chem. Soc. 74, 4792 (1952). — 274. *idem, J. Chem. Educ.* 33, 443 (1956). — 275. Sarkisov E. S., Dokl. Akad. nauk SSSR 62, 231 (1948). — 276. *idem, Ž. fiz. chim.* 24, 487 (1950). — 277. *idem, ibid.* 25, 1415 (1951). — 278. *idem, ibid.* 26, 10 (1952); 28, 627 (1954). — 279. Saukov A. A., *Geochemie*, Praha 1954, 19—28. — 280. Savčenko F., Gornyj ž. 2, 234 (1871).

281. Scrocco E., Salvetti O., Ric. scient. 24, 1258 (1954). — 282. Seaborg G., Uspechi chim. 19, 466 (1950). — 283. *idem, The Transuranium Elements II*, New York 1949, 1492—1524. — 284. *idem, The Actinide Elements*, New York 1954; *Aktinidy*, Moskva 1955, 594—622. — 285. *idem, Angew. Chem.* 70, 414 (1958). — 286. Selinov I. P., Uspechi fiz. nauk 44, 511 (1951). — 287. Sell O. S., J. Chem. Educ. 32, 520 (1955). — 288. Semenenko V. K., Ž. fiz. chim. 31, 273 (1957). — 289. Semišin V. I., Ž. obšč. chim. 25, 2375 (1955). — 290. *idem, Trudy Mosk. inst. chim. mašinostr.* 12, 107 (1957).

291. Seubert K., *Abhandlungen über das natürliche System der chemischen Elemente*



von L. Meyer und von D. Mendelejeff (1864—1869 und 1869—1871). Edicia „Ostwalds Klassiker“, No. 68, 134. — 292. *idem*, Z. anorg. Chem. 9, 334 (1895). — 293. Sheline R. K., Chem. Phys. 18, 927 (1950). — 294. Schaltenbrand G., Z. anorg. allgem. Chem. 112, 221 (1920). — 295. *idem*, *ibid.* 115, 127 (1921). — 296. Scheele F., Z. Naturforsch. 4a, 137 (1949); 5a, 11 (1950). — 297. Scheibe G., Baumgärtner F., Genzer M., Angew. Chem. 67, 502 (1955). — 298. Schenk P. W., Österr. Chemiker-Ztg. 50, 52 (1949). — 299. *idem*, Angew. Chem. 63, 141 (1951). — 300. Scherer G. A., J. Chem. Educ. 26, 133 (1949).

301. Schmidt C., Z. physik. Chem. 75, 651 (1911). — 302. *idem*, *Das periodische System der chemischen Elemente*, Leipzig 1917. — 303. Schoemaker J. L., Sci. Educ. 42, 142 (1958). — 304. Schultze H., Naturwiss. 32, 58 (1944). — 305. Schwarz—Bergkamp E., Monatsh. Chem. 85, 575 (1954). — 306. Sibaiya L., Am. J. Phys. 9, 122 (1941). — 307. Simmons L. M., J. Chem. Educ. 24, 588 (1947). — 308. *idem*, *ibid.* 25, 658 (1948). — 309. Simonov V., Ž. obšč. chim. 24, 925 (1954). — 310. Smith J. D. M., J. Chem. Soc. (London) 1927 (Trans. II), 2029.

311. Smith N., Chem. Ind. 1955, 1673. — 312. Sokoloff V. P., J. Chem. Educ. 31, 15 (1954). — 313. Soddy F., Le Radium 11, 6 (1914). — 314. Solomin N. N., Dokl. Akad. nauk SSSR 59, 711 (1948). — 315. Sonder R. A., Z. anorg. Chem. 192, 257 (1930). — 316. Sotorník V., Přír. vědy ve škole 4, 780 (1954). — 317. *idem*, *ibid.* 4, 871 (1954). — 318. *idem*, *ibid.* 7, 251 (1957). — 319. Spedding F. H., Sci. American 185, No. 5, 26 (1951). — 320. Spicyn V. I., Dokl. Akad. nauk SSSR 71, 1053 (1950).

321. Spicyn V. I., Priroda 1955, No. 2, 3. — 322. Spronsen J. W., Chem. Weekblad 47, 414 (1951). — 323. *idem*, *ibid.* 53, 129 (1957). — 324. Stareck J. E., J. Chem. Educ. 9, 1625 (1932). — 325. Stedman D. F., Can. J. Research 25 B, 199 (1947). — 326. Steinberg R. A., J. Agr. Research 57, 851 (1938). — 327. Stinzing H., Z. physik. Chem. 91, 500 (1916). — 328. Sugathan E. K., Menon T. C. K., Current Sci. 25, 85 (1956). — 329. Swinne R., Z. techn. Physik 7, 166, 205 (1926). — 330. Syrkin J. K., Ďatkina M. J., *Chimičeskaja svjaz i strojenije molekul*, Moskva 1946, 29—57.

331. Szabó Z. G., Lakatos B., Research 5, 590 (1952). — 332. *idem*, Acta Chim. Acad. Sci. Hung. 4, 129 (1954). — 333. *idem*, J. Chem. Educ. 34, 429 (1957). — 334. Ščerbin V. V., Dokl. Akad. nauk SSSR 85, 839 (1952). — 335. Ščukarev S. A., *Trudy jubilejného Mendelejevského sjezda II*, Moskva 1937, 23—35 (rus.), 37—49 (fr.). — 336. *idem*, 75 let periodičeskogo zakona D. I. Mendelejeva i Russkogo chimičeskogo obščestva, Moskva 1947, 31—48. — 337. *idem*, Ž. obšč. chim. 19, 1 (1949). — 338. *idem*, *ibid.* 19, 369 (1949). — 339. *idem*, Vestnik Leningr. univ. 1954, No. 11, 127. — 340. *idem*, Ž. obšč. chim. 24, 581 (1954).

341. Ščukarev S. A., Ž. obšč. chim. 28, 795 (1958). — 342. *idem*, *ibid.* 28, 845 (1958). — 343. Ščukarev S. A., Vasilkova I. V., Vestnik Leningr. univ., Serija fiz.-chim. 1953, No. 2, 115. — 344. Ščukarev S. A., Oranskaja M. A., Ž. obšč. chim. 24, 2109 (1954). — 345. Šemjakin F. M., *ibid.* 2, 62 (1932). — 346. *idem*, Uspechi chim. 2, 630 (1933). — 347. Šišokin V. P., Ž. obšč. chim. 24, 745 (1954). — 348. Špol'skij E. V., *Atomová fyzika I*, Praha 1952, 46—53. — 349. *idem*, *ibid.*, II, Praha 1954, 251—258. — 350. Štandel A. J., Ž. obšč. chim. 19, 981 (1949).

351. Talpain L., J. phys. Radium 6, 176 (1945). — 352. Teich M., *Sborník pro dějiny přír. věd a techniky I*, Praha 1954, 192. — 353. Thomsen J., Z. anorg. Chem. 9, 190 (1895). — 354. *idem*, *ibid.* 9, 283 (1895). — 355. Tomkeieff M. V., Nature 167, 954 (1951). — 356. Tomkeieff S. I., *A New Periodic Table of the Elements Based*

on the Structure of the Atom, London 1954. — 357. *idem*, Nature 173, 393 (1954). — 358. *idem*, Discovery 15, 375 (1954). — 359. *idem*, Sci. Progr. 43, No. 169, 28 (1955). — 360. *idem*, *ibid.* 44, No. 173, 38 (1956).

361. T ü d ö s F., Magyar Kém. Folyóirat 60, 229 (1954). — 362. *idem*, Naturwiss. 41, 138 (1954). — 363. T v e r i t i n o v D. M., Chimija v škole 1955, No. 6, 18. — 364. U k š e E. A., L e v i n E. A. Ž. fiz. chim 29, 219 (1955). — 365. V a j s m a n I. A., Dokl. Akad. nauk SSSR 62, 211 (1948). — 366. V a s i l i e v A. M., Ž. obšč. chim. 27, 2902 (1957). — 367. V e n a b l e P., Periodic law, London 1896. — 368. V e n t r i g l i s U., Periodico mineral 18, 41 (1949). — 369. V i n o g r a d o v A. P., Trudy biochim. labor. 3, 1 (1935). — 370. V o t o č e k E., H e y r o v s k ý J., Anorganická chemie, Praha 1954, 29.

371. V o z d v i ž e n s k i j G. S., Ž. obšč. chim. 19, 1652 (1949). — 372. W a g n e r H. A., B o o t h H. S., J. Chem. Educ. 22, 128 (1945). — 373. W a l d e n P., Ber. 41, 19 (1909). — 374. *idem*, Das Buch der grossen Chemiker, Berlin 1930, 229—287. — 375. W a l k e r W. R., C u r t h o y s G. C., J. Chem. Educ. 33, 68 (1956). — 376. W e r n e r A., Ber. 38, 914 (1905). — 377. *idem*, Neuere Anschauungen auf dem Gebiete der anorganischen Chemie, Braunschweig 1905, 7. — 378. W h e e l e r T. S., Chem. Ind. 1947, 639. — 379. W h e e l e r R. F., *ibid.* 1955, 1441. — 380. W i c h t e r l e O., Přír. vědy ve škole 7, 247 (1957).

381. W i c h t e r l e O., P e t r ů F., Anorganická chemie, Praha 1956, 41—54, 485. — 382. W o l f K. L., Theoretische Chemie, Leipzig 1954, 26—36. — 383. W r i g l e y A. N., M a s t W. C., M e c C u t c h e o n T. P., J. Chem. Educ. 26, 216, 248 (1949). — 384. Y e o u T a, Compt. rend. 221, 441 (1945). — 385. *idem*, Ann. Physique 1, 88 (1946). — 386. Z a c h a r i a s e n W. H., The Actinide Elements, New York 1954; Aktinidy, Moskva 1955, 623—646. — 387. Z a j e v N. J., Ž. obšč. chim. 25, 1844 (1955). — 388. Z a p f f e C. A., Trans. Am. Soc. Metals 38, 239 (1947). — 389. Z a s l a v s k i j I. I., J a c i m i r s k i j K. B., Ž. obšč. chim. 22, 1711 (1952). — 390. Z a v a r i e k i j A. N., Úvod do petrochemie vyvrelých hornin, Bratislava 1955, 15—21.

391. Z i k m u n d M., Konferencia o anorganickéj chémii, Smolenice 1955, 125—134. — 392. Z i o t o w s k i I., Struktura związków nieorganicznych, Warszawa 1956, 13—57 (58—68). — 393. Z m a c z y n s k i E. V., J. Chem. Educ. 14, 232 (1937). — 394. Z n o j k o A. P., Dokl. Akad. nauk SSSR 68, 837 (1949). — 395. *idem*, *ibid.* 68, 1021 (1949). — 396. *idem*, *ibid.* 69, 169 (1949). — 397. Ž d a n o v G. S., Vestnik Mosk. univ. 1957, No. 4, 61.