

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

L. Eckertová

Elektronová autoemise

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 3 (1958), No. 1, 53--59

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/137393>

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>

ELEKTRONOVÁ AUTOEMISE

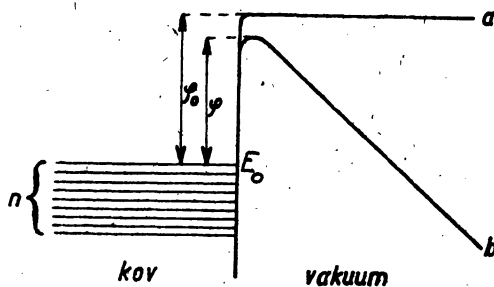
L. ECKERTOVÁ

(Katedra vysoké frekvence a vakuové techniky matematicko-fyzikální fakulty Karlovy university)

Otázka katod pro elektrovakuové přístroje — elektronky a výbojky nejrůznějšího druhu — je stále v popředí zájmu závodů i výzkumných ústavů, protože právě katoda je obvykle tím elementem, který určuje životnost a stabilitu přístroje. Proto je tak mnoho prací věnováno různým druhům termálně emitujících katod, které jsou doposud nejrozšířenější. V poslední době se však stává aktuálním použití nového druhu katod, jejichž mechanismus emise je zcela jiný a pro něž se užívá název autokatody [1], [2].

Mají-li elektrony, nacházející se v pevné látce (na př. v kovu) v potenciálové jámě vyjít z látky ven, musí jim být dodána v nějaké formě energie nejméně rovná výstupní práci φ_0 (viz obr. 1).

1). Bude-li dodána tato energie, bude moci elektron s nejvyšší energetické hladiny v kovu (Fermiho hladiny) právě překonat potenciálovou bariéru. Při dodání větší energie budou moci být jednak uvolněny i elektrony z nižších energetických hladin, jednak se zbývající energie projeví jako počáteční kinetická energie vyletujících elektronů. Podle formy, v jaké se energie dodává, rozlišujeme pak různé druhy emise: thermoemisi, fotoemisi, a sekundární emisi.



Obr. 1. Energetické schéma rozhraní kov-vakuum.
 n — energetické hladiny elektronů v kovu.
 E_0 — Fermiho energie.

Jediný druh emise se vymyká tomuto schématu. Je to t. zv. autoemise, dříve též nazývaná chladná emise, t. j. emise nastávající v silném elektrickém poli (něm. *Feldelektronenemission*). Existuje-li totiž u povrchu kovu silné elektrické pole, dochází ke dvěma efektům. Jednak se vlivem t. zv. Schottkyho zjevu sníží výška potenciální bariéry na hodnotu

$$\varphi = \varphi_0 - \varepsilon \sqrt{\varepsilon E}, \quad (1)$$

kde ε je náboj elektronu a E intenzita elektrického pole, jednak se změní tvar valu tak, jak je naznačeno na obr. 1, případ b. V tomto případě je — jak vyplývá z kvantové mechaniky — určitá pravděpodobnost, že elektrony z kovu projdou tímto valem tunelovým zjevem, aniž by jim musela být dodána energie. Pro výpočet proudu musíme znát rozdělovací funkci $f(\xi, \eta, \zeta)$ pro elektrony uvnitř kovu (ξ, η, ζ jsou složky impulsu) a koeficient prostupnosti bariéry (D), který závisí na její výšce a šířce, což obojí je funkcí intenzity vnějšího elektrického pole. Obecně je možno psát pro hustotu emisního proudu výraz

$$i = \varepsilon \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi, \eta, \zeta) \cdot D(\xi, E) \frac{\xi}{m} d\xi d\eta d\zeta, \quad (2)$$

což po dosazení za $f(\xi, \eta, \zeta)$ Fermiho rozdělovací funkce, za D příslušného výrazu vyplývajícího z kvantové mechaniky a číselných hodnot pro konstanty dává

$$i = 6,2 \cdot 10^{-8} \frac{E_0^{3/2}}{(E_0 + \varphi) \varphi^{1/2}} E^2 \cdot e^{-\frac{6,85 \cdot 10^7 \varphi^{3/2}}{E}} \quad (3)$$

Tento vzorec, odvozený Fowlerem a Nordheimem v r. 1928 [3], platí pro případ, že teplota je rovna absolutní nule, a že bariéra z obr. 1 má trojúhelníkový tvar. Nordheim [4] později zobecnil tento vztah i pro skutečný tvar bariéry, kdy bral v úvahu i sílu zrcadlení a dostal

$$i = 1,55 \cdot 10^{-8} \frac{E^2}{\varphi} \cdot e^{-\frac{6,85 \cdot 10^7 \varphi^{3/2}}{E}} \cdot \vartheta \left(\frac{3,62 \cdot 10^{-4} \sqrt{E}}{\varphi} \right), \quad (4)$$

kde ϑ je t. zv. Nordheimova funkce, která je tabelována. Guth a Mullin [5] teoreticky zpracovali případ emise při vyšších teplotách ($T > 0$), kdy se obecně začíná projevovat i thermoemise, a který bývá někdy označován jako emise $T - F$. Došli k výrazu

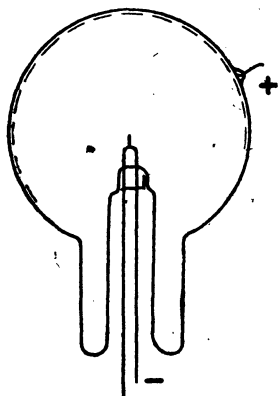
$$i = 1,55 \cdot 10^{-8} \frac{E^2}{\vartheta^2 \varphi} + \\ + 120,54 T^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} \left(\frac{1}{n + 8,813 \cdot 10^3 \vartheta \varphi^{1/2} \frac{T}{E}} + \frac{1}{n - 8,813 \cdot 10^3 \vartheta \varphi^{1/2} \frac{T}{E}} \right) e^{-6,888 \cdot 10^7 \frac{\varphi^{3/2} \vartheta}{E}} \quad (5)$$

Experimentálně byla autoemise pozorována již před více než 50 lety, ale teprve po vypracování teorie objevil se větší počet prací všímajících si tohoto zjevu systematictěji. Šlo především o to, dokázat či vyvrátit správnost navrhované teorie. Experimenty narážely na značné potíže technického rázu. Protože dobře měřitelná autoemise začíná při intenzitách pole řádově 10^6 V/cm, bylo především nutno realizovat takováto pole. Toho se dosahuje výraznou asymetrií systému, kdy katoda je ve formě velmi jemného hrotu s poloměrem křivosti řádově až desetiny μ a anoda je obyčejně kulová plocha s poloměrem řádově 10 cm (obr. 2). Na skleněné baňce, jejíž kovový povlak slouží za anodu, je zpravidla nanášen luminifor, takže elektrony vyletující radiálně z hrotu způsobují fluorescenci a vytvářejí na stínítku zvětšený emisní obraz katody. Takovýto systém, nazývaný elektronovým projektorem, může tedy sloužit i jako elektronový emisní mikroskop, vyznačující se krajní jednoduchostí a dostihující přitom zvětšení $5 \cdot 10^5$ až 10^6 a rozlišovací schopnosti až asi 20 Å.

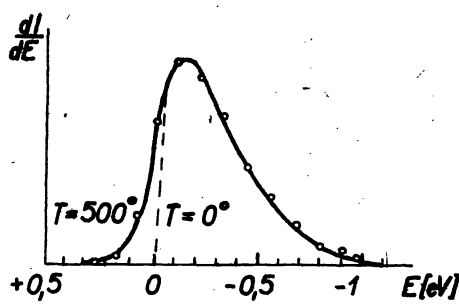
Jemné kovové hroty se k těmto účelům zhotovují většinou elektrolytickým leptáním tenkých drátků. Pro přesné stanovení intesity pole u hrotu je třeba vybrat hroty dobře symetricky odleptané a přesně změřit jejich poloměr křivosti. To nebylo možno většinou provést s pomocí optického mikroskopu teprve použití elektronového mikroskopu umožnilo dosáhnout větší přesnosti. Všechny dosavadní spolehlivé experimentální výsledky jsou ve velmi dobré shodě s teorií. Jsou to jak měření závislosti emisního proudu na intenzitě pole na a teplotě, tak i měření energetického rozdělení emitovaných elektronů,

kteřá ukázala, že maximum tohoto rozdělení je u Fermiho energie, jak vyplývalo i z teorie, a že i tvar rozdělovací křivky velmi dobře souhlasí s teoretickým (obr. 3) [6].

Při dostatečně vysokých intenzitách pole je možno dosáhnout teoreticky proudových hustot $10^6 - 10^8$ A/cm². Tato okolnost je prakticky velmi důležitá, a proto jí byla v poslední době věnována zvýšená pozornost. Zajímavé výsledky jsou shrnuty v pracích Dykea a jeho spolupracovníků (viz např. [7], [8]), kteří se snažili dosáhnout maximální možné hustoty proudu. Pracovali ve velmi dobrých vakuových podmínkách (konečný tlak v aparatuře 10^{-12} a nižší) a používali impulsní metody, aby se pokud možno vyhnuli všem rušivým faktorům, jako je adsorpce plynů na hrot, jeho bom-



Obr. 2. Elektronový projektor.



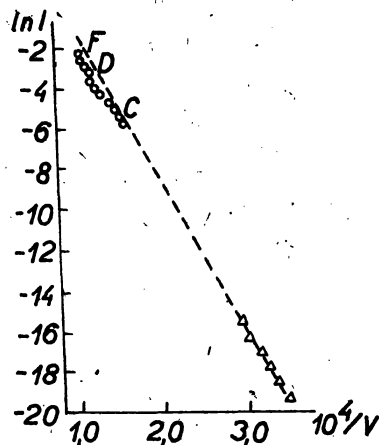
Obr. 3. Energetické rozdělení autoelektronů. Spojitá čára — teoretická křivka, body — experimentální hodnoty.

bardování ionty, zahřívání atd. Při stejnosměrném měření dostali celkem stabilní proud, jemuž odpovídala proudová hustota 10^6 A/cm². Další zvyšování proudu způsobovalo už velké zahřátí anody a uvolňování z ní plynů, které zhoršovaly vakuum a měnily podmínky pokusu. Při snímání proudu v krátkých (mikrosekundových) impulsích bylo možno zvýšit proudovou hustotu až na 10^7 A/cm². Teprve v této oblasti se poněkud zhoršuje souhlas s Nordheimovou teorií, naměřené hustoty jsou poněkud menší než teoretické (obr. 4). To je možno vyložit působením vznikajícího prostorového náboje [9]. Při dalším zvětšení E začíná charakteristika stoupat prudčeji, což patrně souvisí s tím, že při tak velkých proudech se hrot již sám zahřívá a začíná tepelně emitovat a při hustotě řádově 10^8 A/cm² přechází autoemise v t. zv. vakuový oblouk. Autoři jej vysvětlují jako výboj v ionisovaných parách wolframu, který způsobí roztavení hrotu.

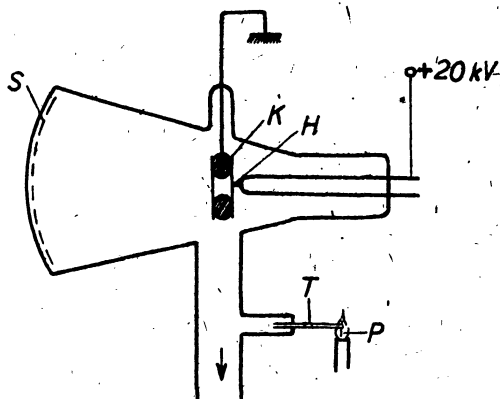
Přestože bylo u autoemise záhy dosaženo větší dokonalosti ve smyslu souhlasu teorie a experimentu než u ostatních druhů emise, a přestože by auto-katody měly mnohé přednosti před jinými katodami, až doposud se jich prakticky neužívalo.

Hlavní příčina spočívá v tom, že se dlouho nedařilo dostat dostatečně stabilní autoelektronový proud. Jak je vidět z uvedených vzorců, tento proud velmi silně závisí na výstupní práci. To znamená, že emise bude velmi silně ovlivňována vrstvičkami, které se adsorbují na hrot a které se v průběhu práce

mohou přesouvat a způsobovat tak značné výkyvy proudů. Kromě toho hrot trpí bombardováním ionty zbytkových plynů, které může měnit jeho tvar a tudíž i hodnoty intenzity pole u povrchu. Aby se zabránilo adsorpci plynů na hrot a jeho bombardování ionty, je třeba pracovat při velmi dobrém vakuu, řádově asi 10^{-9} a méně. Dále je nutná naprostá čistota používaných součástí. Obě tyto podmínky je už možno při dnešní úrovni experimentální techniky dosti dobře splnit. Kromě toho jsou experimentálně hledány látky, které by málo adsorbovaly a u nichž by tudíž vakuové podmínky nebyly tak kritické. Zatím byla nalezena jedna taková látka, a to rhenium [10]. S tohoto hlediska bylo prozatím prozkoumáno málo látek (pracovalo se dosud hlavně s wolframem, molybdenem, železem a niklem). Zvláště je třeba připomenout, že dosud



Obr. 4. Závislost autoelektronového proudu na napětí. \circ — hodnoty změřené stejnosměrnou metodou, Δ — hodnoty změřené impulsní metodou, $C-D$ — oblast vlivu prostorového náboje, F — vznik vakuového oblouku.



Obr. 5. Müllerův iontový projektor, S — fluorescenční stínítko, K — kruhová elektroda, H — hrot, T — paladiová trubička, P — vodíkový plamen.

velmi málo prací se zabývalo autoemisi z polovodičů a dielektrik. Základy teorie autoemise těchto látek vybudovali Morgulis [11] a Stratton [12], ale experimentální sledování jsou teprve v samých začátcích.

Dnes se nám již rýsují hlavní směry použití autokatod.

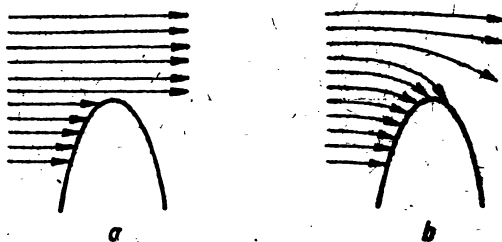
Předně by měla autokatoda mnohé přednosti jako zdroj elektronů v elektronkách, neboť nepotřebuje žádný žhavicí příkon jako thermokatody. Je tedy jednak energeticky výhodnější, jednak emituje okamžitě po vložení napětí, nejeví setrvačnost. Je tedy možné, že s jejím použitím by elektronky mohly konkurovat polovodičovým přístrojům. Dioda tohoto typu byla už sestrojena a vyzkoušena [13]. — V elektronice by mohla být též využita neobyčejně velká strmost systému s autokatodou. Pro mnohé účely jsou neocenitelné malé rozměry autokatody, které ji předurčují všude tam, kde je žádoucí bodový zdroj, jako v elektronové optice (mikroskopech, obrazovkách, atd.). K tomu přistupuje zvláště ta okolnost, že je možno odebírat ohromné proudové hustoty, což má velký význam zvláště pro přístroje pracující na ultravysokých frekvencích. Kromě toho se otevírá perspektiva [14]

použití autokatod v röntgenových lampách jednak pro účely röntgenovského mikroskopu, jehož rozlišovací schopnost by se tak přiblížila rozlišovací schopnosti elektronového mikroskopu, jednak pro röntgenospektroskopii pro bodovou analýsu.

Zatím co použití autokatody jako zdroje elektronů je ještě v podstatě otázkou budoucnosti, je její použití v t. zv. elektronových projektorech již značně rozšířeno. S jeho pomocí studuje se jednak přímo struktura emitujících povrchů, jednak různé povrchové zjevy. Je možné na př. určovat výstupní práci jednotlivých krystalických ploch, studovat adsorpci na nich a desorpci polem, migraci, povrchovou ionisaci atd.

Rozlišovací schopnost elektronového projektoru roste s vloženým napětím.

Napětí však není možno libovolně zvyšovat z důvodů, o nichž jsme již mluvili, Müller [15] první poukázal na to, že je možno podstatně zvýšit rozlišovací schopnost, použijí-li se místo elektronů ionty, jimž odpovídá kratší vlnová délka de Broglieho vln a začal pracovat s t. zv. iontovým projektorem. Nejprve zjistil, že při přepólování normálního projektoru je možno vložit na něj větší napětí. Při hodnotách int-



Obr. 6. Dráhy molekul v okolí hrotu: a) bez pole, b) s polem.

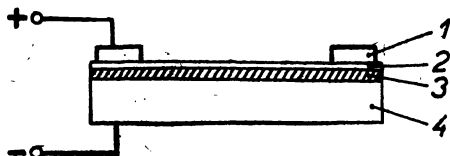
ensity pole 80–120 MV/cm atomy barya adsorbované na hrotu desorbují se v podobě iontů. Protože ionty vznikají v různých místech hrotu a pak se pohybují prakticky přímočaře ke stínítku, vzniká na něm obraz hrotu, vytvořený ionty. Aby vzniklé proudy byly dostatečně velké a obraz na stínítku dost jasný, je třeba zajistit stálé doplňování atomů, které by se mohly na hrotu adsorbovat. To je umožněno stálým připouštěním adsorbujícího se prvku, na př. vodíku, tak jak je to znázorněno na obr. 5. Zajímavé je, že v tomto uspořádání při ohromných intenzitách pole nedochází v trubici k samostatnému výboji ani když tlak stoupne až na 10^{-3} mm Hg. Rozlišovací schopnost iontového projektoru je 2–4 Å. Protože rozlišovací schopnost je určována též velikostí počátečních tepelných rychlostí částic, je-li možno ještě zvýšit tím, že se měření provádějí při teplotě kapalného vzduchu. Tato rozlišovací schopnost je řádově stejná jako velikosti molekul a atomů, což nás přivádí k otázce přímého „vidění“ molekul a určování jejich struktury. J. A. Becker pozoroval v elektronovém mikroskopu jasné stopy, podle jejichž chování usoudil, že pocházejí od jednotlivých adsorbovaných molekul. Prozatím není vyjasněna otázka, vzniká-li obraz rozptylem autoelektronů na molekule nebo přímo elektrony této molekuly samé odtrženými silným elektrickým polem.

Iontového projektoru bylo použito též k účelům hmotové spektroskopie produktů ionisace v silném elektrickém poli [16] a bylo dosaženo velké rozlišovací schopnosti (šířka maxima pro ionty s energií 10.000 eV byla 20 eV). Tato metoda má velký význam pro teorii molekulárních sil a může být použita na př. též pro pozorování procesů štěpení kovových katalysátorů.

Další zajímavou aplikaci popsali Drechsler a Müller [17]. Dosud existovala jen jedna metoda pro měření polarisace neutrálních molekul a i ta byla

experimentálně velmi náročná. Měření polarisace v elektronovém projektoru spočívá v tom, že molekuly, procházející ve svazku kolem hrotu projektoru, se polarisují a jejich dráhy se v silně nehomogenním poli zakřívují. Molekuly dopadají pak i na tu oblast hrotu, která je normálně ve „stínu“ (viz obr. 6) a místo kam dopadají může se v projektoru přesně určit. Maximální dosažitelná přesnost této metody je asi 10%.

Nakonec je třeba se zmínit ještě o druhé, principiálně jiné cestě získávání autoelektronů. Ta byla v podstatě objevena Malterem v roce 1936 při studiu sekundární emise složitých povrchů. Malter [18] zjistil neobyčejně veliký koeficient sekundární emise, dosahující až hodnoty 1000 u katody, která se skládala z hliníkové destičky pokryté vrstvou oxidu Al_2O_3 , na níž byla nadsorbována vrstvička cesia. Charakteristickým znakem této emise byla



Obr. 7. Schema Vudynského autokatody. 1 – kontaktní kroužek, 2 – vrchní polopropustná kovová elektroda, 3 – vrstva izolátoru, 4 – spodní kompaktní kovová elektroda.

velká setrvačnost. Malter sám vyložil tuto „anomální sekundární emisi“ tak, že sekundární emise má zde jen pomocnou úlohu, a že jde v podstatě o autoemisi. Je-li totiž koeficient sekundární emise větší než jedna, nabíjí se vrchní vrstvička kladně, a protože Al_2O_3 je dobrým izolátorem, může v něm vzniknout pole řádově až 10^6 V/cm, které stačí na to, aby vyvolalo autoemisi z podložky. Protože vznikající autoelektrony jsou poměrně rychlé, projdou dielektrikem

a nemohou prakticky rekombinovat s povrchovým kladným nábojem. Gradient nutný ke vzniku autoemise se může tedy udržet ještě dlouhou dobu po přerušení primárního paprsku. Tento druh emise byl později sledován i na jiných katodách a jeho odlišení od „pravé“ sekundární emise provedli Zernov a Kulvarská [19].

Byly činěny pokusy vytvořit potřebný gradient v tenké vrstvičce izolátoru i jiným způsobem, zejména přímým vložením napětí. Vytvoření katod tohoto typu bylo by velmi lákavé, protože na rozdíl od hrotových katod bylo by možno dostávat autoemisi z větší plochy, což je pro některé účely žádoucí a zároveň by odpadla potřeba zdroje vysokého napětí. Takové katody sestrojil Vudynskij [20]. Jako izolátoru používal buď též Al_2O_3 nebo velmi tenké (10^{-5} cm) lístky slídy. Vrchní elektroda byla buď napařená polopropustná kovová vrstva, nebo jemná kovová síťka. Mezi kovovou podložku a vrchní elektrodu vkládal napětí řádově desítek voltů, takže výsledné pole bylo asi 10^6 V/cm (obráz. 7). Velikost emisního proudu bylo možno řídit vloženým napětím.

Bohužel katody tohoto druhu nedávají zatím, dosti stabilní emisní proud. Hlavní příčinou toho je probíjení velmi tenké isolační vrstvy v silném elektrickém poli. Proto nemohlo být těchto katod zatím prakticky použito. Nicméně je možno předpokládat, že v budoucnosti budou nalezeny metody, jak emisní proud stabilisovat, a že jak hrotové tak i plošné autokatody najdou své uplatnění v praxi.

Literatura

- [1] Morgulis N. D., *Izv. AN, fys.*, 1956, 20, 977.
- [2] Zernov D. V., Elinson M. I., *Rad. i elektr.*, 1956, 1, 5.
- [3] Fowler R.-H., Nordheim L. W., *Proc. Phys. Soc. A*, 1928, 119, 173.
- [4] Nordheim L. W., *Phys. Čas.*, 1929, 30, 177.

- [5] Guth E., Mullin C. J., Phys. Rev., 1942, 61, 339.
 [6] Müller E. W., Zs. f. Phys. 1943, 120, 261.
 [7] Dyke W. P., Trolan J. K., Phys. Rev., 1953, 89, 799.
 [8] Dyke W. P., PIRE, 1955, 43, 162.
 [9] Barbour J. P., Dolan W. W., Trolan J. K., Martin E. E., Dyke W. P., Phys. Rev. 1953, 92, 45.
 [10] Barnes G., Phys. Rev. 1955, 97, 1579.
 [11] Morgulis N. D., ŽTF, 1947, 17, 983.
 [12] Stratton R., Proc. Phys. Soc. B., 1955, 68, 746.
 [13] Jones F. L., Nature, 1955, 175, 244.
 [14] Lebeděv A. A., Izv. AN 1956, 20, 975.
 [15] Müller E., Zs. f. Phys., 1951, 131, 136.
 [16] Ingram M., Gomer R., J. Chem. Phys., 1954, 22, 1279.
 [17] Drechsler M., Müller E., Zs. f. Phys., 1952, 132, 195.
 [18] Malter L., Phys. Rev. 1936, 49, 478; 50, 48.
 [19] Černov D. V., Kulvarskaja B. S., ŽTF, 1946, 16, 71; 771.
 [20] Vudynskij M. M., ŽTF, 1950, 20, 1306.
 [21] Roginskij S. Z., Tretjakov J. J., Ž. fiz. chim. 1956, 30, 11, 2539.

VÝZKUMY HORNÍCH VRSTEV ATMOSFÉRY POMOCÍ VÝŠKOVÝCH RAKET¹⁾

Академик А. А. БЛАГОНРАВОВ

V programu Mezinárodního geofyzikálního roku (v dalším MGR) je mnoho místa věnováno výzkumu horních vrstev ovzduší. Cílem tohoto výzkumu je rozšířit a zpřesnit dnešní znalosti o hustotě a tlaku vzduchu, o jeho složení a pohybech v horních vrstvách, o elektrických vlastnostech ionosféry, o kosmickém záření, o ultrafialové složce slunečního spektra, o slunečním záření všeobecně, o pevné složce kosmické látky, o zemském geomagnetickém poli.

Výzkumy v tomto směru nemají jen obecně poznávací význam. Jsou důležité i v praxi pro zdokonalování meteorologické služby a předpovídání počasí, pro zdokonalování dálkových bezdrátových komunikací, konečně jsou také mimořádně důležité pro získání nutných základních dat při řešení otázky meziplanetárního spojení.

Výzkumné metody, jichž se zde používá, jsou přímé a nepřímé. Nepřímými se nazývají ty metody, pomocí nichž se zkoumají horní vrstvy atmosféry se zemského povrchu; přímými se nazývají ty metody, jimiž se přístroje dopravují na místo pozorování.

Dnešní raketová technika umožnila používat přímých method ve velkém měřítku. Příslušné přístroje, jimiž se žádoucí pozorování mají konat, jsou dopravovány raketami do potřebných výšek buď přímo, nebo ve zvláštních přepravních zařízeních²⁾, která se po dosažení potřebné výšky mohou od rakety odpoutat. Rozvoj této techniky spolu s růstem rychlostí raket umožnily stavět umělé družice Země, což samo zase podstatně rozšiřuje časové hranice výzkumů. Přístroje, které raketa vynese přímo do horních vrstev ovzduší, mohou jen poměrně krátkou dobu registrovat zkoumaný jev nebo děj.

¹⁾ Ak. A. A. Благонравов, Исследование верхних слоев атмосферы при помощи высотных ракет. Vestnik AN SSSR, 1957, č. 6, str. 25–32.

²⁾ V originále *kontejner*; překládám termínem „přepravník“. J. V.