

# RADIOAKTIVNÍ VLASTNOSTI HORNIN

**Radioaktivní přeměna prvků:** jaderná přeměna

Při radioaktivních přeměnách vzniká záření alfa, beta a gama a dochází k záchytu elektronů v jádře

**Jaderné radioaktivní záření:** *částice alfa* (heliová jádra, 2 protony, 2 neutrony), *částice beta* (elektrony), *záření gama* (elektromagnetické záření)

**Přírozeně radioaktivní prvky:** U, Th, K a jiné méně významné, Rb, Sm, Lu, Re .

U, Th tvoří přeměnové řady

# Zákon přeměny

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

$N_0$  - původní počet atomů,  $N$  - současný počet atomů,  $e$  –základ přirozeného logaritmu,  $t$  - čas,  $\lambda$  - přeměnová konstanta

Poločas přeměny  $T$

$$T = \ln 2 / \lambda = 0.693 / \lambda$$

Je to doba, za kterou se rozpadne jedna polovina z počátečního množství atomů radioaktivního prvku. Za  $7T$  zbude 1% z  $N_0$ .

Střední doba života  $\tau$

$$\tau = \lambda^{-1}$$

$$T \text{ } ^{238}\text{U} = 4,51 \cdot 10^9 \text{ yr,}$$

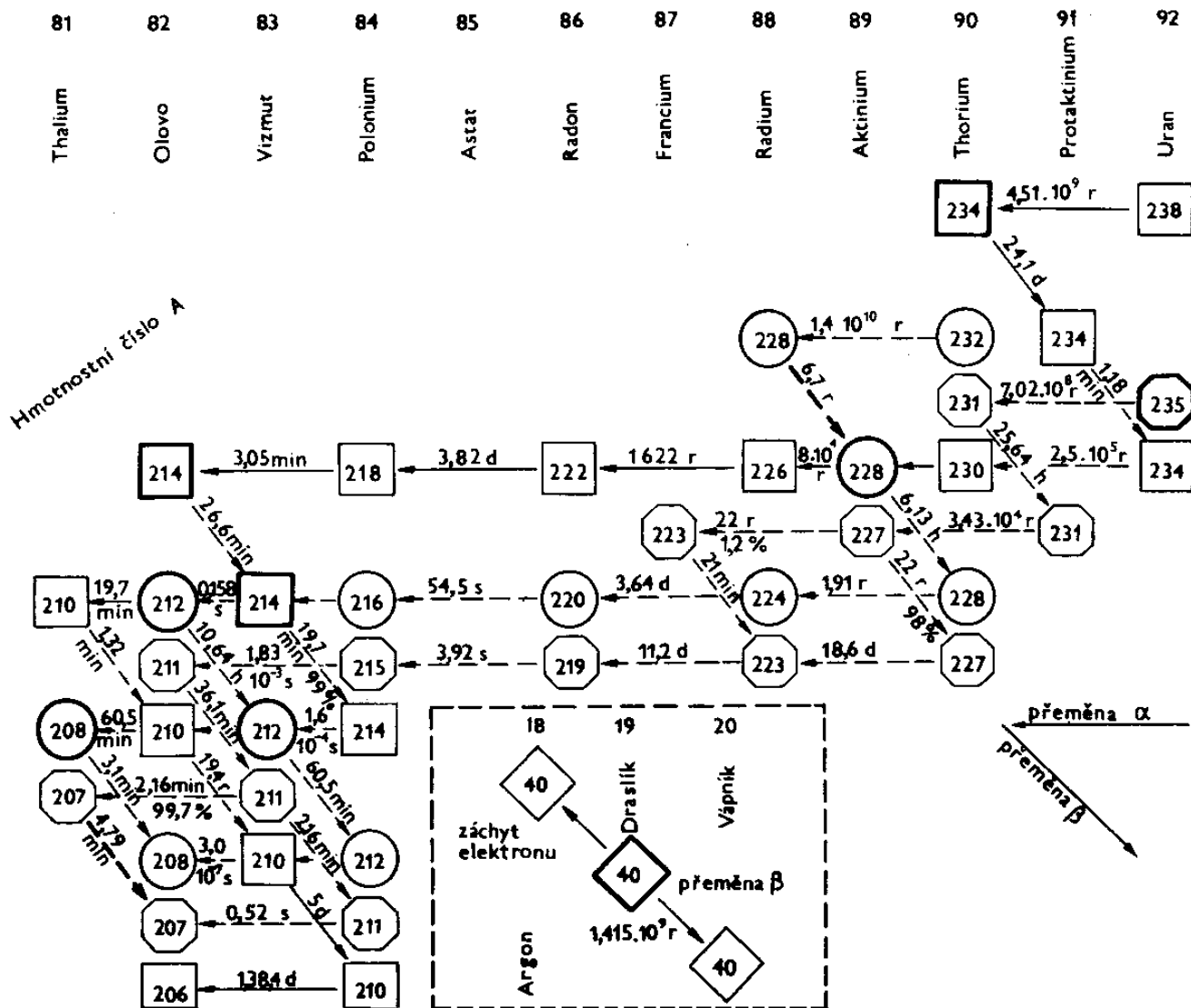
$$T \text{ } ^{232}\text{Th} = 1,4 \cdot 10^{10} \text{ yr}$$

$$T \text{ } ^{235}\text{U} = 7,02 \cdot 10^8 \text{ yr}$$

$$T \text{ } ^{40}\text{K} = 1,3 \cdot 10^9 \text{ yr}$$

# Přeměnové řady $^{238}\text{U}$ , $^{235}\text{U}$ , $^{232}\text{Th}$ a přeměna $^{40}\text{K}$

## Vliv záření $\alpha$ a $\beta$



# Přeměnové řady 2

Přeměnové řady :

1. uranová –  $^{238}\text{U}$ , končí olovem  $^{206}\text{Pb}$ . Nejdůležitější členy řady: radium  $^{226}\text{Ra}$ , radon  $^{222}\text{Rn}$ .  $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra} = 1 : 3,4 \cdot 10^{-7}$
2. actiniová –  $^{235}\text{U}$ , končí olovem  $^{207}\text{Pb}$
3. thoriová –  $^{232}\text{Th}$ , končí olovem  $^{208}\text{Pb}$

Poměr obou uranových izotopů je v přírodě konstantní, stejně tak i poměr  $^{40}\text{K}$  k ostatním neradioaktivním izotopům  $^{39}\text{K}$  a  $^{41}\text{K}$ .

Izotop draslíku  $^{40}\text{K}$  se přeměňuje dílem vyzařováním beta na vápník (zvětšuje se kladný náboj jádra, tedy počet protonů), dílem dochází k záchytu elektronu a mění se na argon  $^{40}\text{Ar}$  (změní se proton na neutron, ubude kladných nábojů jádra).

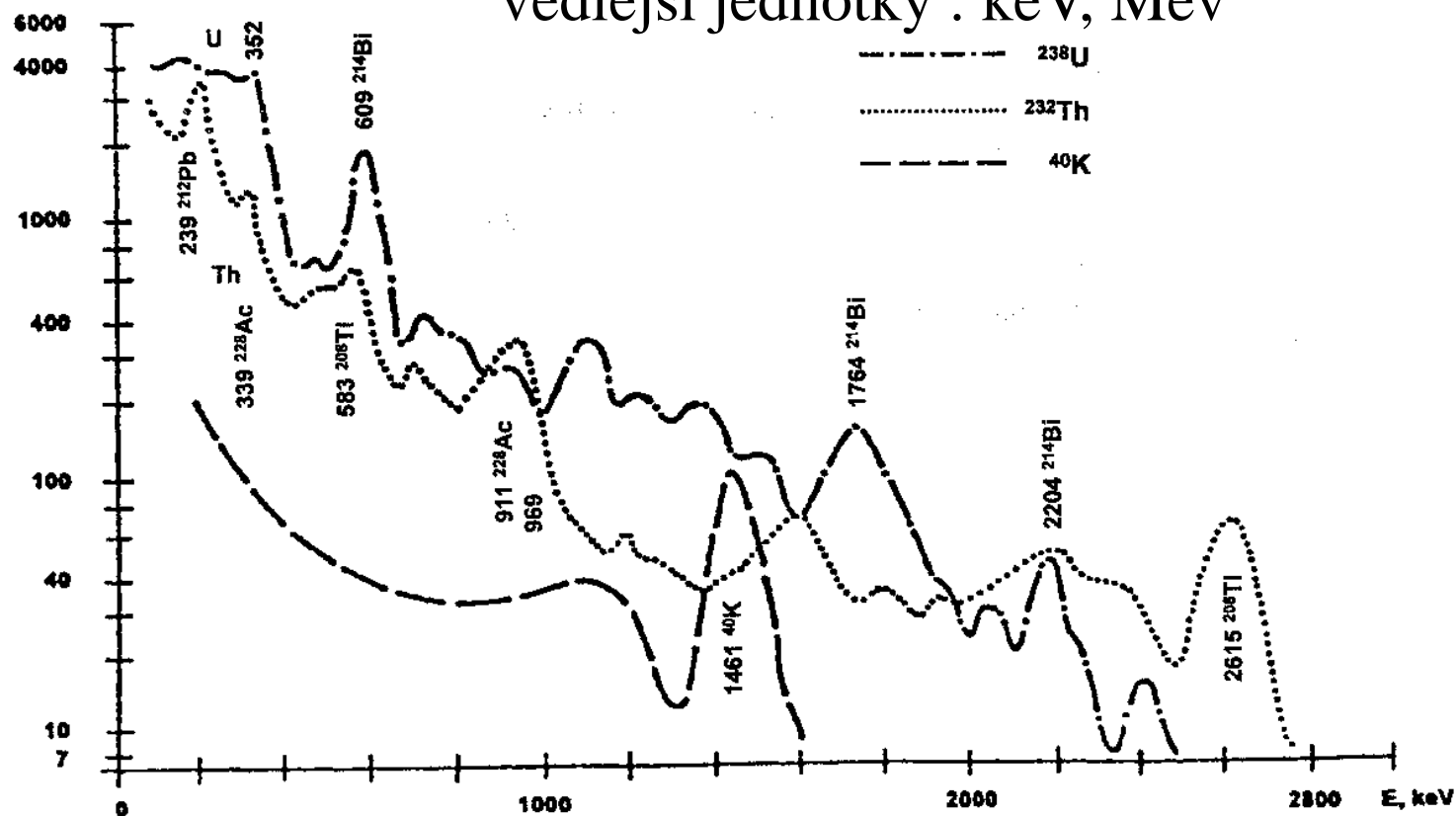
Poměr obou přeměn je konstantní.

Využití v geologii: stanovení absolutního stáří, metody K-Ar, Ar-Ar,  $^{238}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{235}\text{U}$  -  $^{207}\text{Pb}$ ,  $^{232}\text{Th}$  -  $^{208}\text{Pb}$ ,  $^{206}\text{Pb}$  -  $^{207}\text{Pb}$ ,  $^{206}\text{Pb}$  -  $^{208}\text{Pb}$ .

# Spektra záření gama (detekovaná)

$$1 \text{ eV} = 1,6021892 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

vedlejší jednotky : keV, MeV



# Měření radioaktivity

Obsahy U, Th, K stanovíme na základě registrace energetického spektra záření gama, buď celého, nebo jeho částí (oken), měřicí přístroj je **scintilační spektrometr** vybavený **sondou s krystalem NaJ(Tl), příp. GeLi, nejnověji krystaly s W a jiné.** Emisní spektra záření gama – ostře oddělené energie, ale spektra převážně detekovaná spektrometry s Na J(Tl) krystalem jsou méně diskrétní. Záření gama má nejdelší dolet, ve vzduchu stovky metrů, není pohlcováno tak intenzívně jako záření beta a zejména záření alfa.

**Obsahy U a Th se udávají v ppm, obsah K v hm. %.**

*Laboratorní spektrometrie gama* - měří se horninové vzorky nadrcené jako hrubý kvart a nasypané do nádoby zvoleného tvaru a vložené do olověného stínění. Přesnější než stanovení vlastního U je stanovení  $eU$  (resp.  $U_{Ra}$ ) podle energetických píků Ra, Bi aj. Podle poměru  $eU/U$  značně odchylném od 1 soudíme na porušení radioaktivní rovnováhy. Doba měření je nejméně 20 minut.

# Měření radioaktivity 2

**Terénní spektrometrie:** po nacejchování přístroje se měří **obsahy eTh, eU, a K**, sonda se klade do mělkých jamek nebo mělkých vrtů (geometrie přibližně  $4\pi$ ). Vegetační pokryv, navětralá vrstva a voda signál zeslabují. Při měření v dolech je také geometrie  $4\pi$ . Na výchozech je nutné zachovat přibližně geometrii  $2\pi$ , na kterou je přístroj nacejchován, alespoň do 0,8 m od měřicí sondy. Doba měření je obvykle 2 až 4 minuty. Hloubkový dosah asi  $\frac{1}{2}$  m, maximálně 1 m. **Letecká spektrometrie:** měří po nacejchování rovněž eTh, eU a K, hodnoty jsou zatíženy vlivem navětralé vrstvy, porostů (korekce na lesy, dříve nebyla stanovena) a vodních ploch. Vliv počasí. Při **automobilové spektrometrii** je možný vliv kameniva použitého na stavbu silnic, může to být i hlušina z uranových dolů. Terénní i letecká spektrometrie gama poskytují v našich poměrech nižší hodnoty obsahů než laboratorní spektrometrie na čerstvých horninách, vliv slaběji aktivní navětralé vrstvy nelze odstranit

# Měření radioaktivity 3

Kromě obsahu K, U a Th se měří a v minulosti převážně měřila tzv. intenzita záření gama nebo-li **dávkový příkon záření gama**, event. **úhrnná aktivita gama**. Je to sumární počet impulzů registrovaný od určité prahové energie výše. Nevýhodou tohoto parametru je závislost na geometrii uspořádání a volbě prahové energie. Dříve byl udáván v  $\mu\text{R/h}$  nebo v Ur, což je tzv. uranový ekvivalent, nyní v jednotkách dávkového příkonu,  $D_a$  v nGy/h - nanogrey za hodninu. Převodní vztahy:

$$1,67 \text{ Ur} = 1\mu\text{R/h}$$

$$1\mu\text{R/h} = 8,69 \text{ nGy/h}$$

Výrazně se v  $D_a$  prosazuje obsah K, menší uranové a thoriové anomaly jsou v něm potlačeny. Mapy úhrnné aktivity gama jsou připojeny k vysvětlivkám ke geofyzikálním mapám ČR 1: 50 000



## Měření radioaktivity 4

Terénní stanovení **objemové aktivity  $^{222}\text{Rn}$  a  $^{220}\text{Rn}$**  se používají přenosné radonové detektory vybavené scintilačními ZnS (Ag) Lucasovými komorami nebo ionizačními komorami. Výsledky se vyjadřují v  $\text{kBq}/\text{m}^3$ . Obvyklé jsou hodnoty 0 – 100  $\text{kBq}/\text{m}^3$ .

Hmotnostní jednotkou je  $\text{kBq}/\text{kg}$

Jaderný spád z jaderné elektrárny v Černobylu z r. 1986, lze dosud indikovat podle zvýšené radioaktivity  **$^{137}\text{Cs}$** , které se projevuje ve spektrometrii na píku 662 keV.

# Produkce tepla

Přeměna jader atomů radioaktivních prvků je provázena uvolněním tepelné energie. Teplo vznikající přeměnou radionuklidů je udáváno veličinou jejich tepelné produkce.

$$1\% \text{ K: } 3,58 \cdot 10^{-12} \text{ W.g}^{-1}$$

$$1 \text{ ppm U: } 9,7 \cdot 10^{-8} \text{ W.g}^{-1}$$

$$1 \text{ ppm Th: } 2,7 \cdot 10^{-8} \text{ W.g}^{-1}$$

Tepelná produkce na  $\text{m}^3$  objemu horniny za jednotku času je dána vztahem

$$\mathbf{A = 0,133 D (0,262 K + 0,718 U + 0,193 Th) \cdot 10^{-3} [\mu\text{W.m}^{-3}],}$$

D je hustota v  $\text{kg.m}^{-3}$ , obsahy U a Th jsou v ppm, obsah K v hm %.

Teplo vznikající rozpadem radionuklidů pravděpodobně kompenzuje tepelné ztráty Země.

# Distribuce U, Th a K v minerálech a horninách

*Draslík:* draselné živce, leucit, biotit, muskovit, flogopit, illit

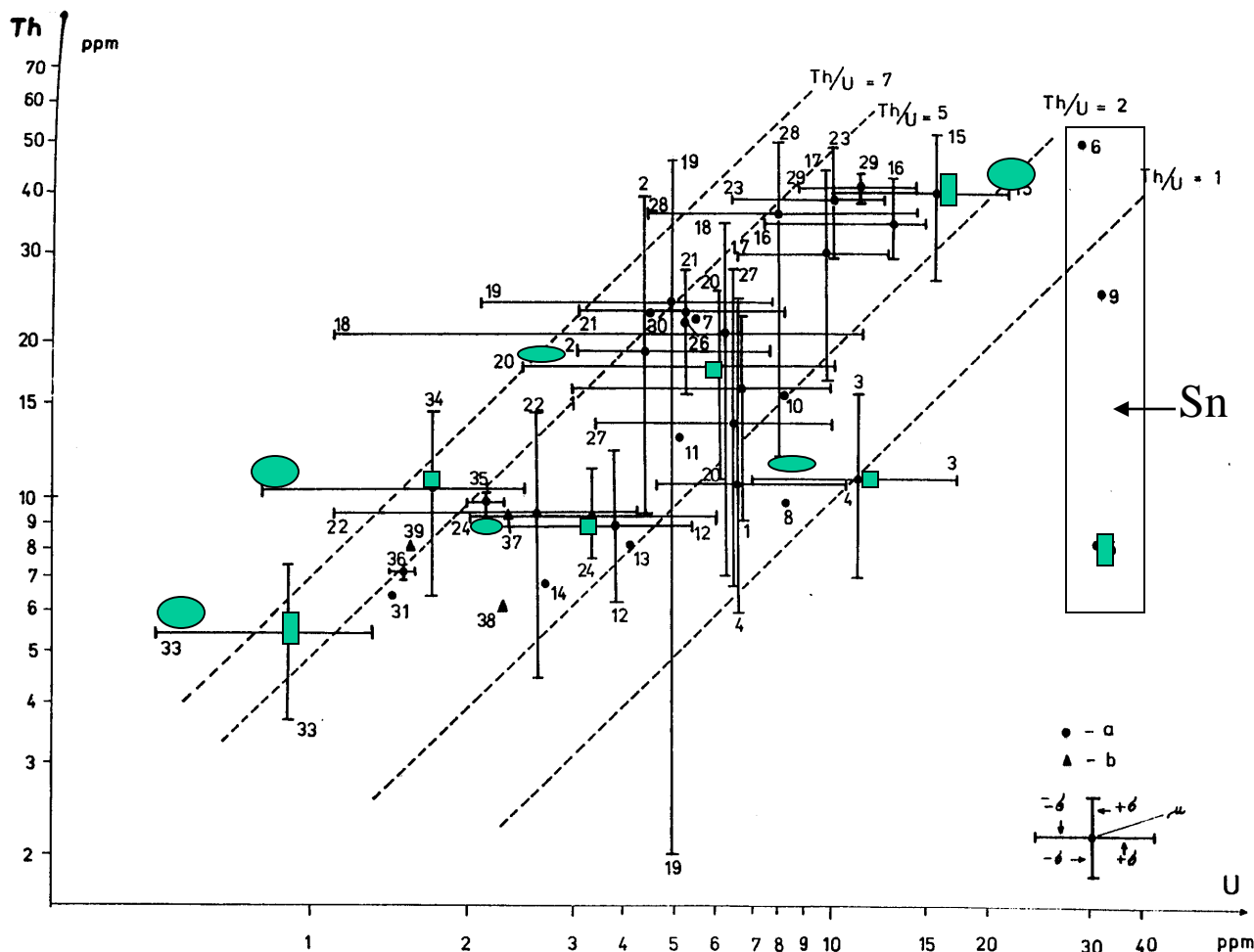
*Uran a thorium:* vyskytují se jako příměsi v řadě akcesorických minerálů, z nichž primární jsou titanit, apatit, **zirkon**, xenotim, **monazit a allanit** a jiné. Podstatnější množství se vyskytuje v oxidech, **uraninitu, smolinci**, thorianitu, některých síranech, niobotantalátech a titanátech. Mezi nejvýznamnější sekundární minerály patří **uranové a thoriové černě** (gumity).

Uran v šestivalentní formě je značně mobilní, thorium je geochemicky stabilní, výjimečně je mobilní v alkalických roztocích.

# Distribuce K, U a Th v hlubinných magmatitech

Hornina	K (hm%)	U (ppm)	Th (ppm)
Granity	3.73	5.4	24.6
Granodiority	2.34	3.1	12.4
Syenity	4.75	8.6	27.8
Diority	1.83	2.6	9.2
Tonality	1.50	2.0	6.4
Gabra	0.60	0.59	3.1
Anortozity	0.34	0.64	1.6
Ultrabazika	0.02	0.050	0.095

# Distribuce K, U a Th v **granitoidech** Českého masívu



33 Brněnský m.,  
východní část  
34 Brněnský m.,  
západní část  
15 SČP, durb.  
20 SČP, blat. typ  
24 Luž. pluton,  
rumb. granit  
3 KV pl., YIC  
granit  
5 KV pl, Sn  
granit

# Radioaktivita granitů bývalého SSSR

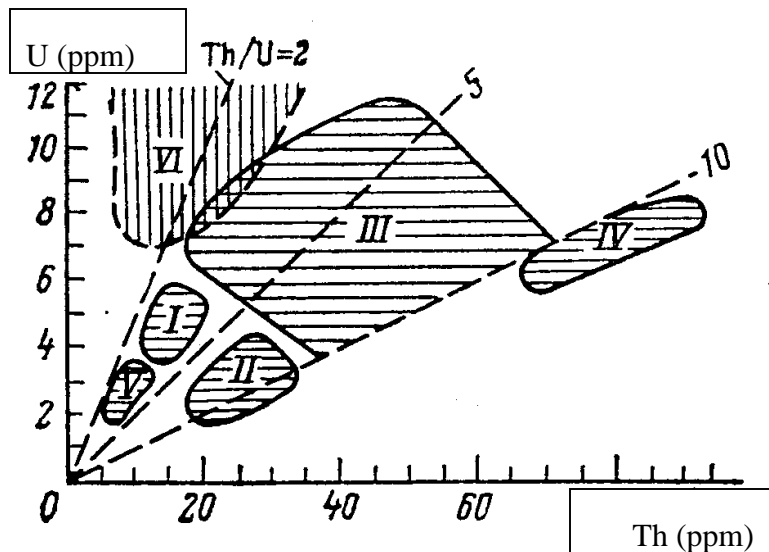


Рис. VII.9. Главнейшие радиогеохимические типы гранитов.

*I* — нормально радиоактивные граниты,  $Th/U \approx 2,5 \div 4,5$ ; *II* — повышенно-радиоактивные граниты,  $Th/U \approx 6 \div 10$ ; *III* — высокордиоактивные редкометальные граниты,  $Th/U \approx 5 \div 10$ ; *IV* — высокордиоактивные ториеносные граниты,  $Th/U > 10$ ; *V* — слаборадиоактивные плагиограниты,  $Th/U \approx 2 \div 5$  (по Л. В. Комлеву); *VI* — высокордиоактивные существенно ураноносные,  $Th/U \approx 1 \div 2$  граниты эвгеосинклинальных (?) зон

I - normálně radioaktivní granity

II - granity se zvýšenou radioaktivitou

III - silně radioaktivní granity se vzácnými zeminami

IV - silně radioaktivní thoriové granity

V - slabě radioaktivní plagiogranity

VI - silně radioaktivní uranonosné granity

# Histogramy Th, U a K v granitech

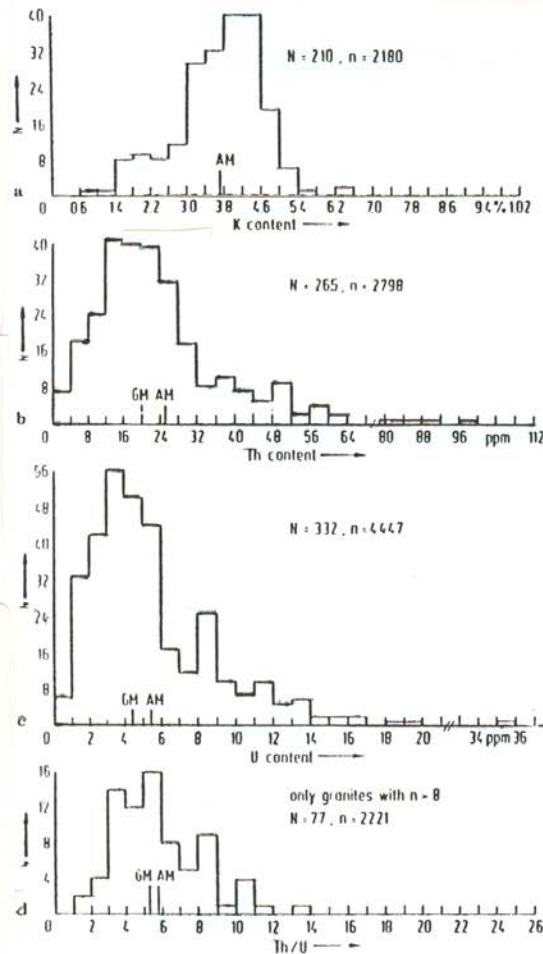


Fig. 3. Histograms of the a) K-content, b) Th-content, c) U-content and d) Th/U ratio in granites. Adapted from U. Haack (1982).

# Granodiority

## Histogramy

K, U, Th

a produkce tepla

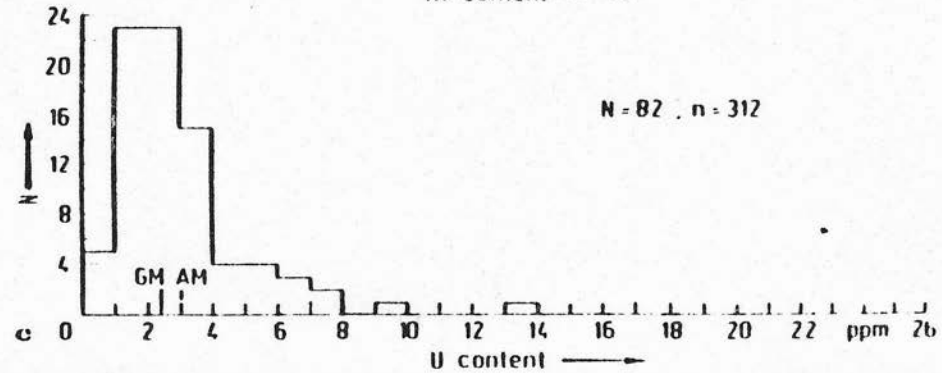
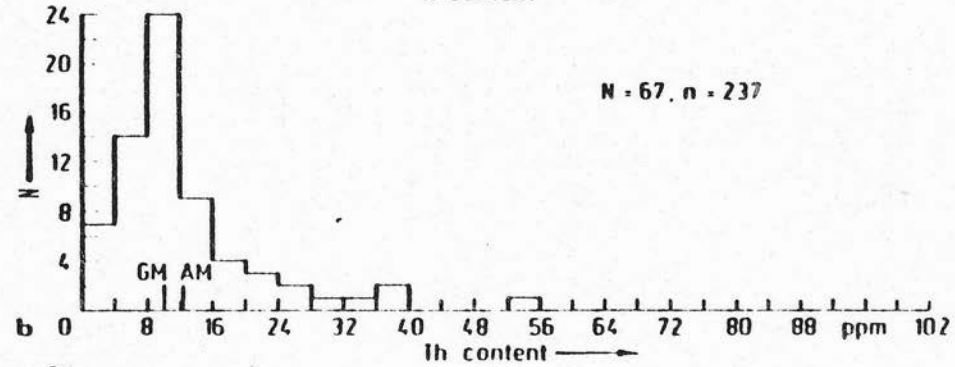
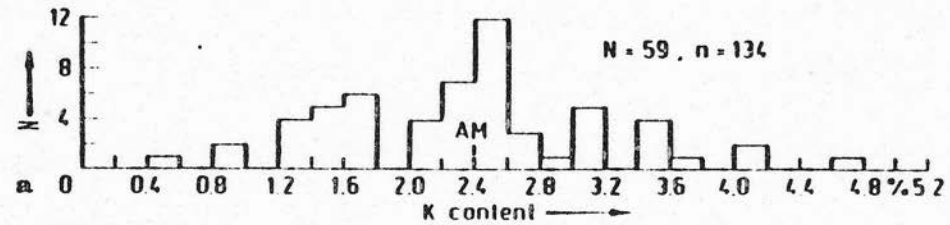
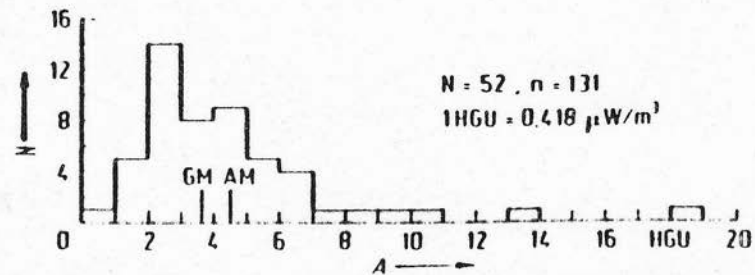


Fig. 17a-c. Histograms of the K (a), Th (b) and U (c) concentrations in granodiorites.





# Radioaktivita vulkanitů

Horniny	K (hm. %)	U (ppm)	Th (ppm)
Ryolity-IA	2.4	2.8	10.9
Ryolity-CM	3.05	5.6	8.2
Ryolity-IC	4.43	5.3	17.5
Ryolity-I	4.21	14.0	36.2
Trachyty-IA	4.83	3.4	16.0
Trachyty-IC	<b>3.10</b>	<b>5.0</b>	<b>12.7</b>
Trachyty-I	<b>5.64</b>	<b>17.0</b>	<b>58.6</b>
Dacity-IA	1.53	1.5	6.1
Dacity-CM	2.21	2.6	4.2
Andezity-IA	1.23	0.98	4.1
Andezity-CM	1.73	1.9	4.3
Andezity-IC	2.52	5.5	8.7

# Radioaktivita vulkanitů - pokračování

Tholeiity-IA	0.32	0.36	0.59
Tholeiity-CM	0.54	0.54	1.3
Tholeiity-IC	0.63	0.75	3.1
Tholeiity-OC	0.17	0.14	0.52
Alk-čediče-IA	1.13	1.0	4.6
Alk-čediče-CM	1.37	1.2	3.7
Alk-čediče-IC	<b>1.17</b>	<b>1.1</b>	<b>6.2</b>
Fonolity-IC	<b>4.97</b>	<b>7.8</b>	<b>18.5</b>
Fonolity-I	<b>6.60</b>	<b>26.3</b>	<b>105.4</b>
Latity-I	3.81	8.5	25.8
Bazanity-IC	<b>1.78</b>	<b>2.2</b>	<b>10.7</b>

IA - ostrovní oblouky, OC - oceánické vulkanity, CM - aktivní kontinentální okraje, IC - intrakontinentální vulkanity, I - intrakontinentální, italský typ

# Radioaktivita vulkanitů Českého masívu

a - diferenciáty

b - bazika

1 spility proterozoika

39 olivin. čediče terc.

41 polzenity sv. křída

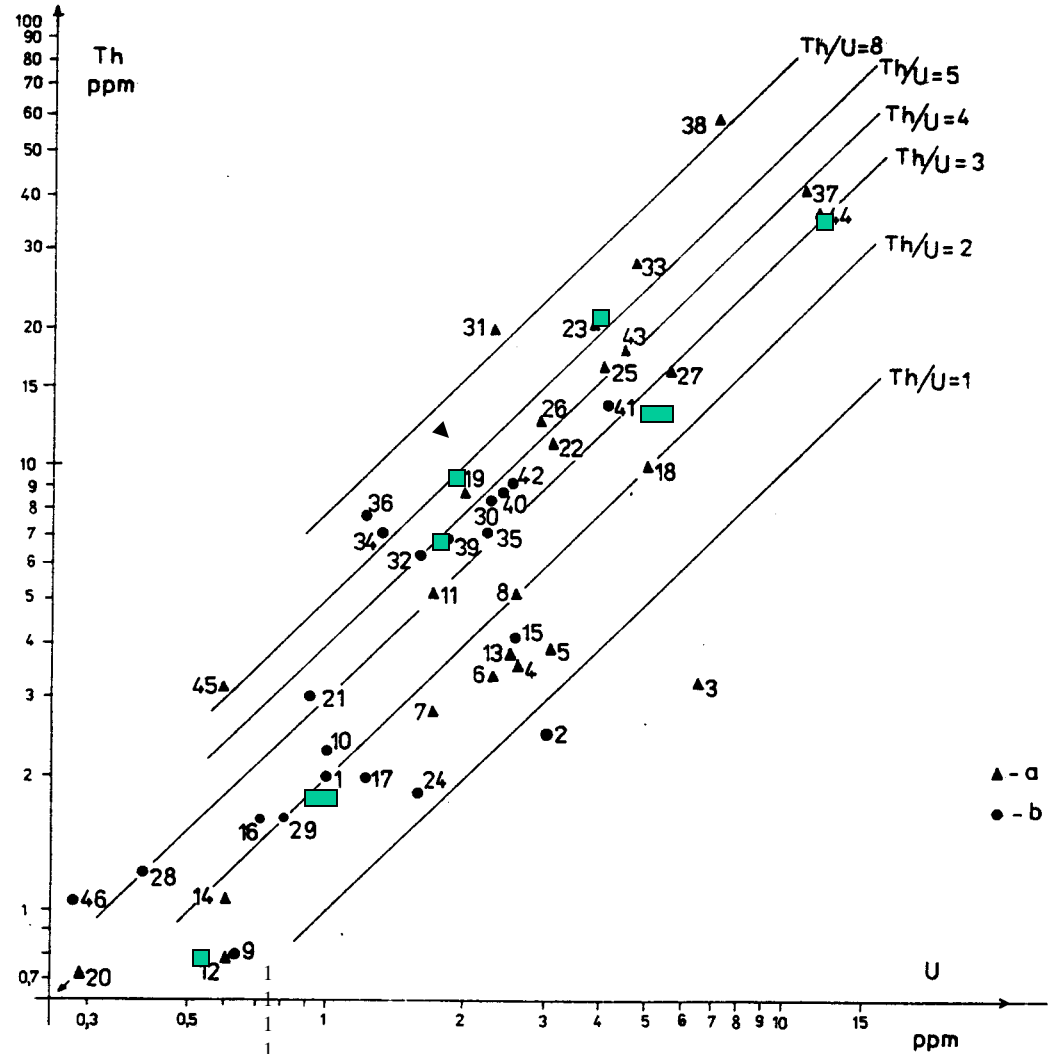
12 ryolity jíl. pásma

19 kambrické ryolity

23 ordovické ryolity-

Železné hory

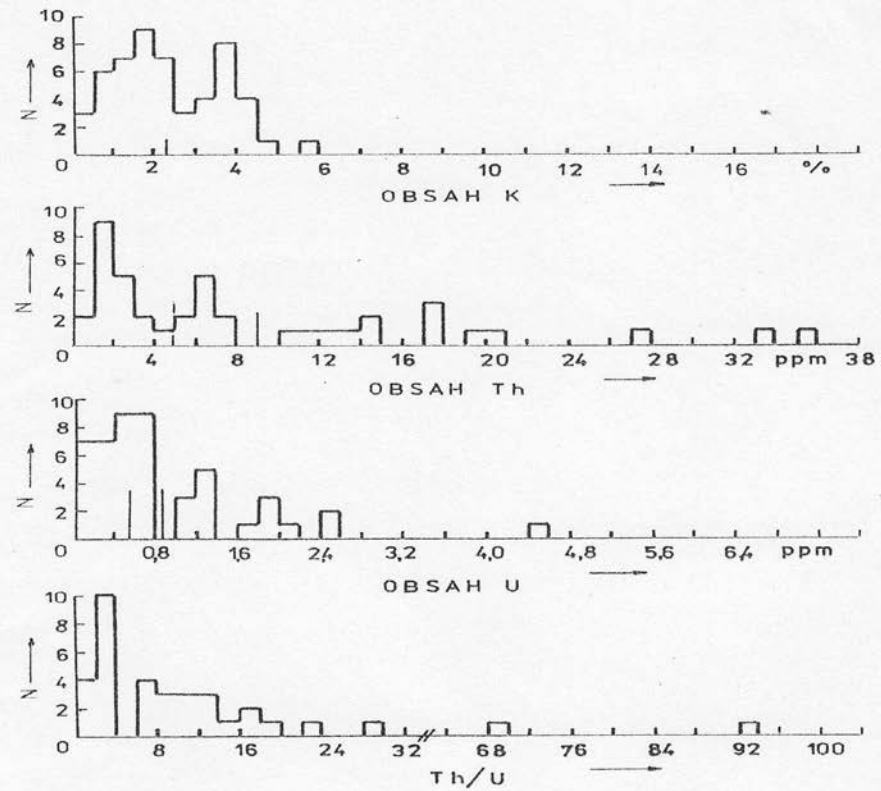
44 fonolity, terc., ČS



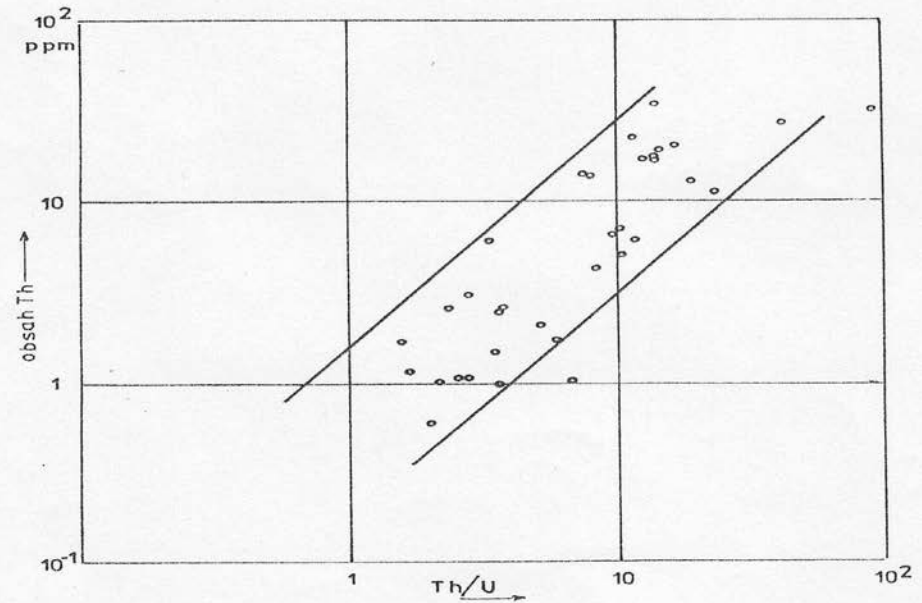
**Obr. 16 :** Distribuce U a Th ve vulkanitech proterozoického až tercierního stáří v Českém masívu.

# Histogramy K, U, Th a poměru Th/U v granulitech

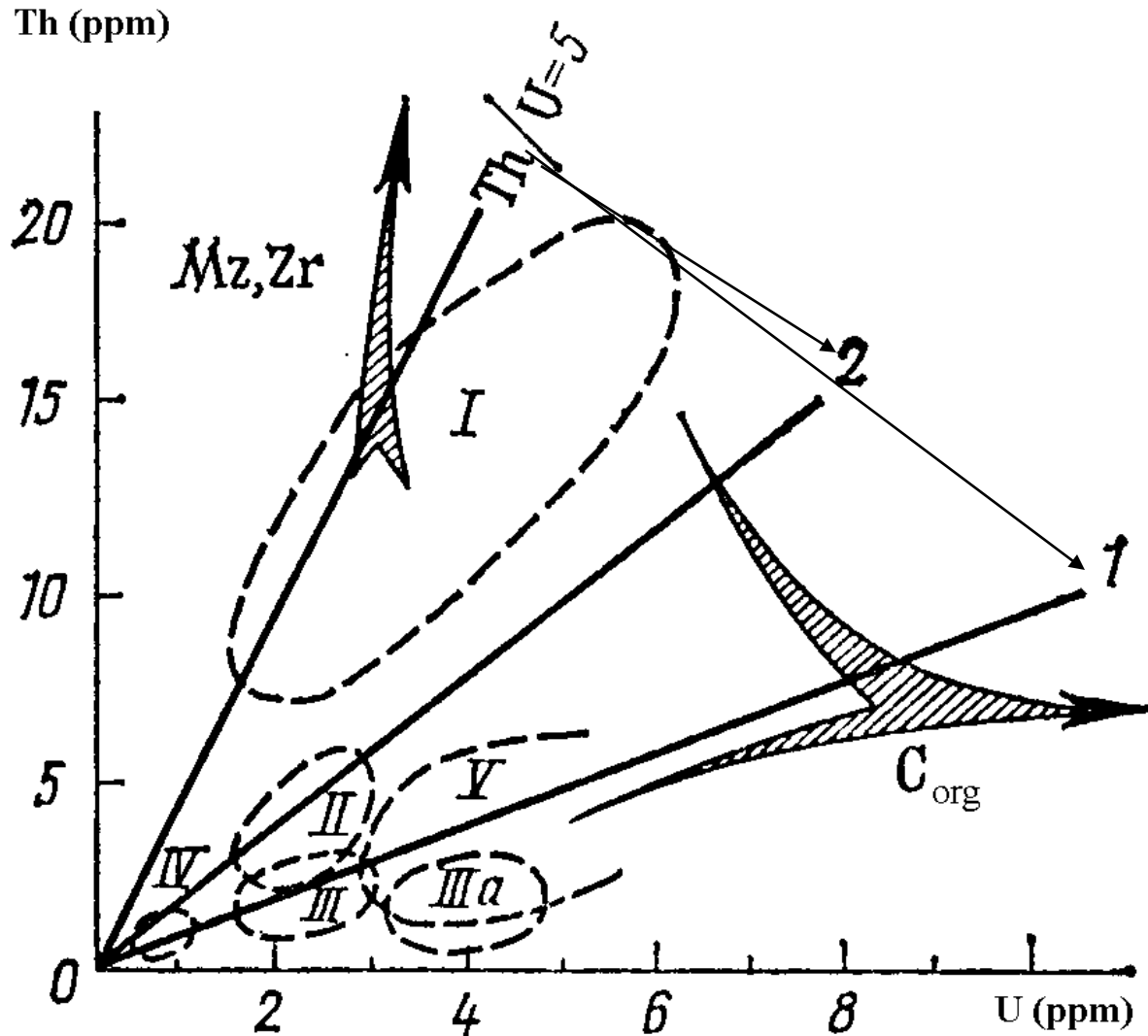
a)



b)



# Radioaktivita sedimentů



- Sedimenty:
- 1 terigenní
  - 2 křemenné
  - 3 karbonátové
  - 3a dolomity
  - 4 soli
  - 5 kaustobiolity

## Radioaktivita sedimentů – tab. 1

Horniny	K (%)	U(ppm)		Th (ppm)	
	AM	AM	GM	AM	GM
STARŠÍ :					
Pískovce	0.74	2.0	1.5	5.5	4.4
Droby	1.33	2.0	1.8	6.9	6.2
Břidlice	2.29	3.4	3.1	11.5	10.7
Černé břidlice	2.60	20.2	12.1	10.9	9.3
Vápence	0.66	2.5	1.8	2.0	1.3
Dolomity	0.40*	3.7*	-	2.8*	-

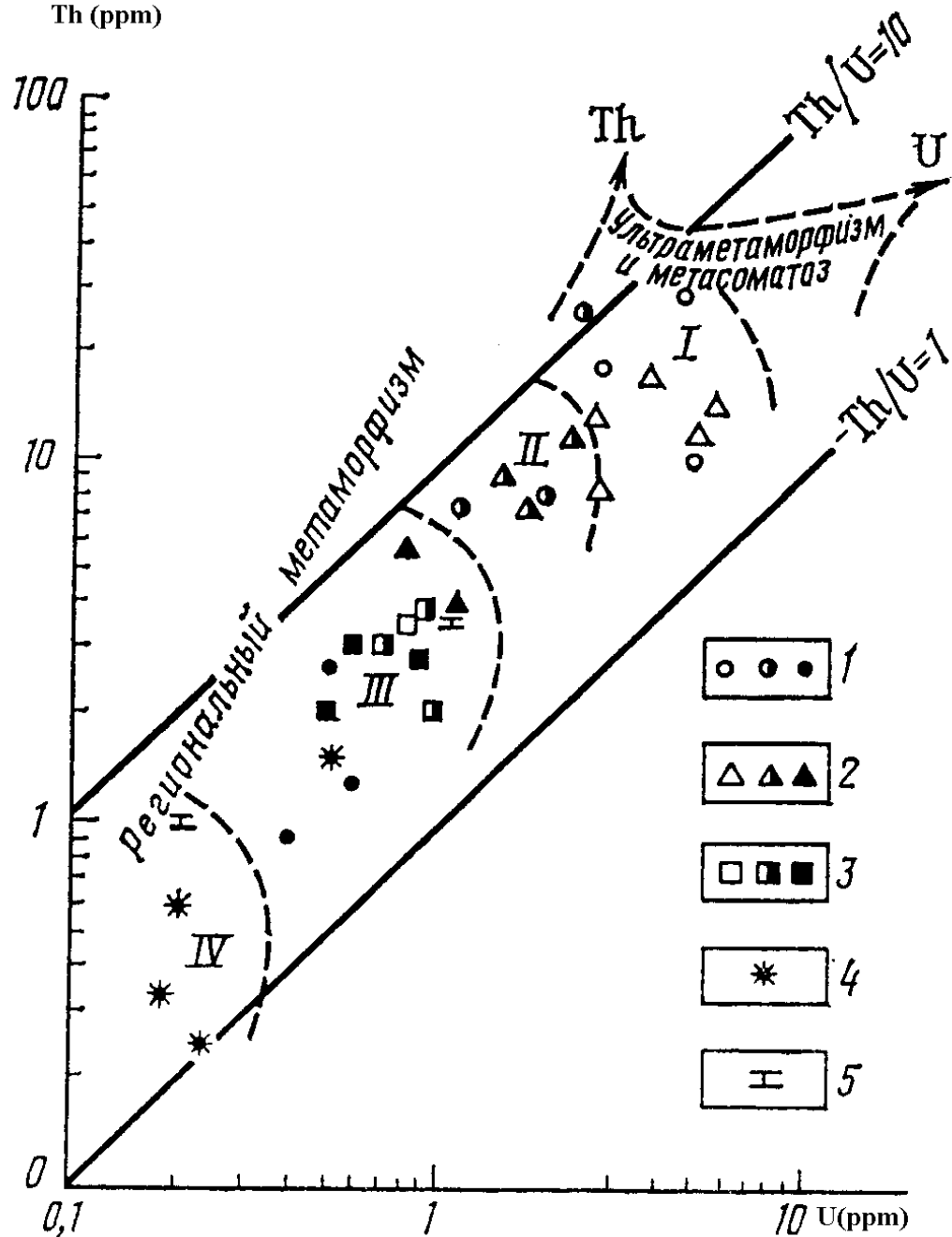
Pozn.: Obsahy U v uhlí značně kolísají, od jednotek do tisíců ppm, obsahy K jsou velmi nízké, obsah Th se většinou neuvádí. Pro černé uhlí v Rusku udává Dortmanová et al. 0.1 % K, 3.4 ppm U a 4.8 ppm Th; \* - převzato z Dortmanové et al. (1984).

## Radioaktivita sedimentů – tab. 2

MLADŠÍ, RECENTNÍ:	K		U		Th	
	AM	AM	GM	AM	GM	
Jíly hlubokomořské	-	2.8	1.7	9.5	8.6	
Vápence organodetr.	-	1.2	0.6	0.1	0.05	
Písky šelfové	-	1.7	1.4	4.7	3.8	
Fosfority	0.3	91.9	59.9	27.0	3.8	
Manganové nodule	-	6.8	5.2	25.0	9.3	
Bentonity	4.14	5.5	4.5	24.0	22.9	
Bauxity	-	7.5	5.4	42.0	31.3	

---

Th (ppm)



# Radioaktivita metamorfitů

Metamorfnní facie:

I zelených břidlic a

epidotických amfibolitů

II amfibolitová

III granulitová

IV eklogitová

Horniny:

1 ruly

2 metamorfnní břidlice

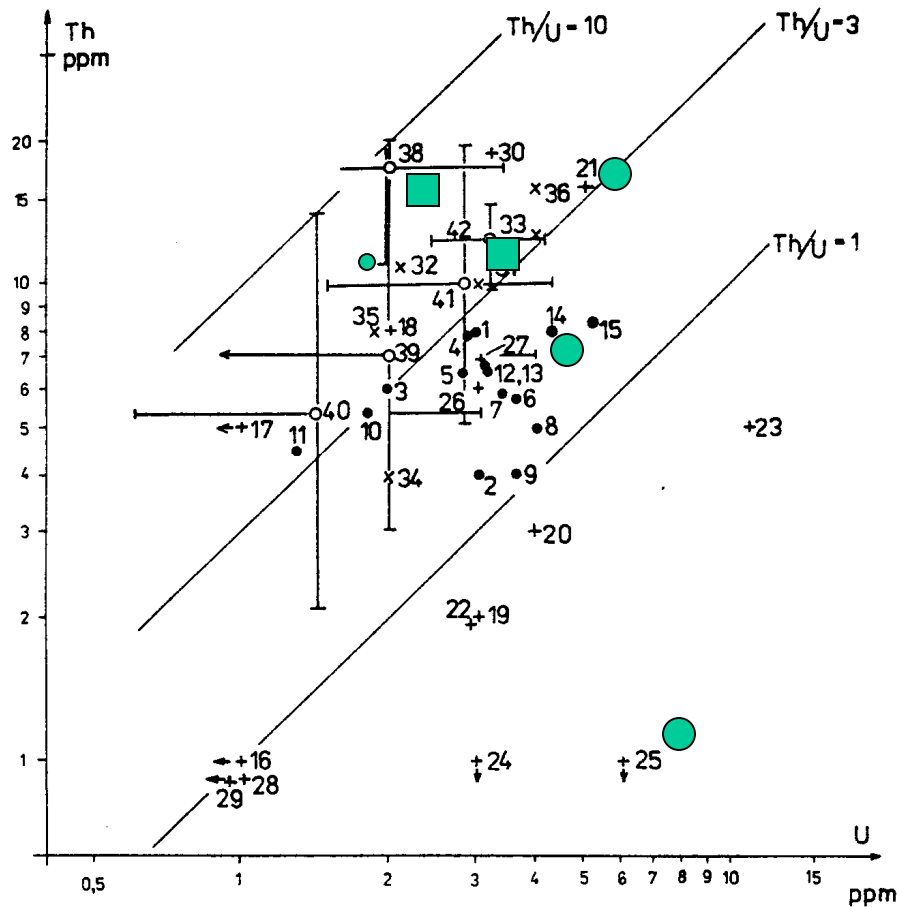
3 amfibolity

4 eklogity

5 mramory



# Radioaktivita metamorfitů Českého masívu



- 38 paleozoické fylity
- 32, 33 kulm
- 14 barrand. proter. DS
- 21 ordov. břidlice
- 25 silur, váp. břidlice
- 42 moldanub. pararuly

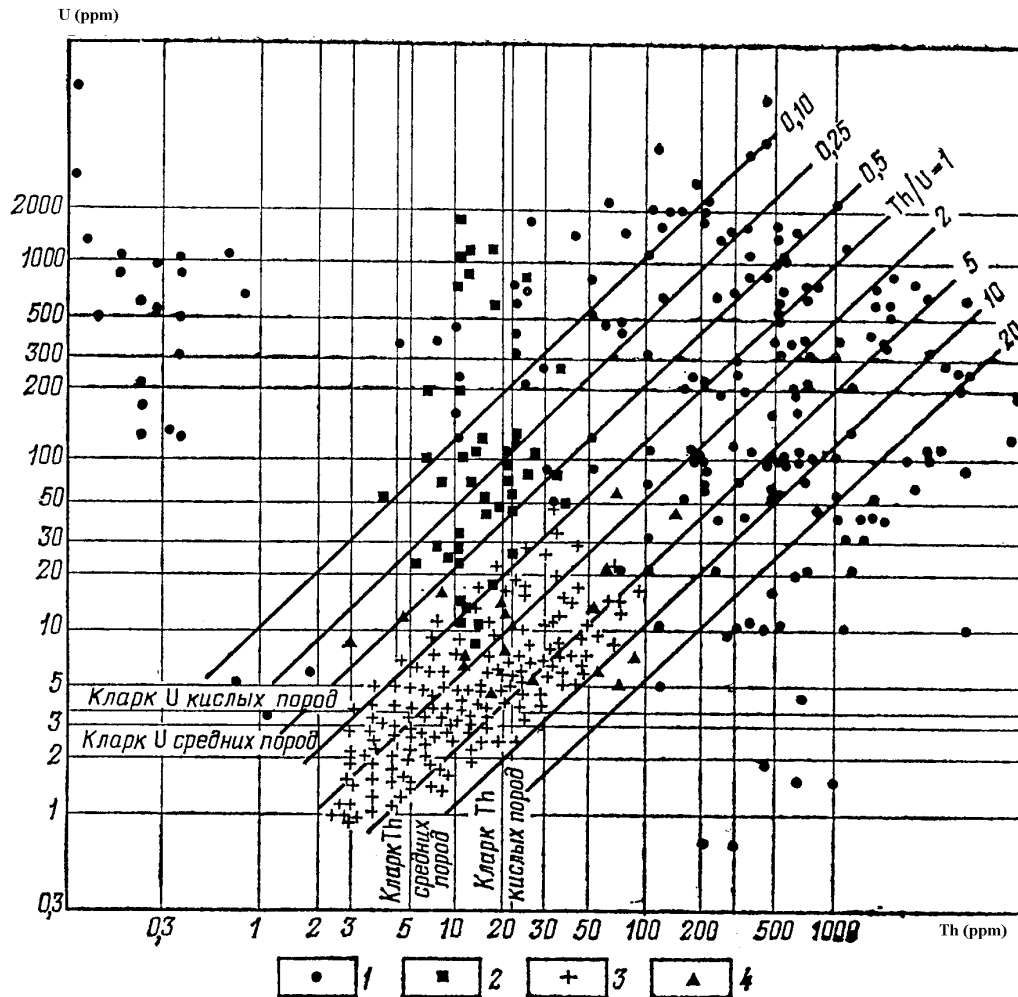
# Radioaktivita metamorfitů

Thorium je při metamorfóze vysoce stabilní, zejména v bazických horninách. Jeho mobilita až po granulitovou facii se nepředpokládá. Výjimkou jsou alkalické roztoky, ve kterých je Th mobilní i za nižších teplot..

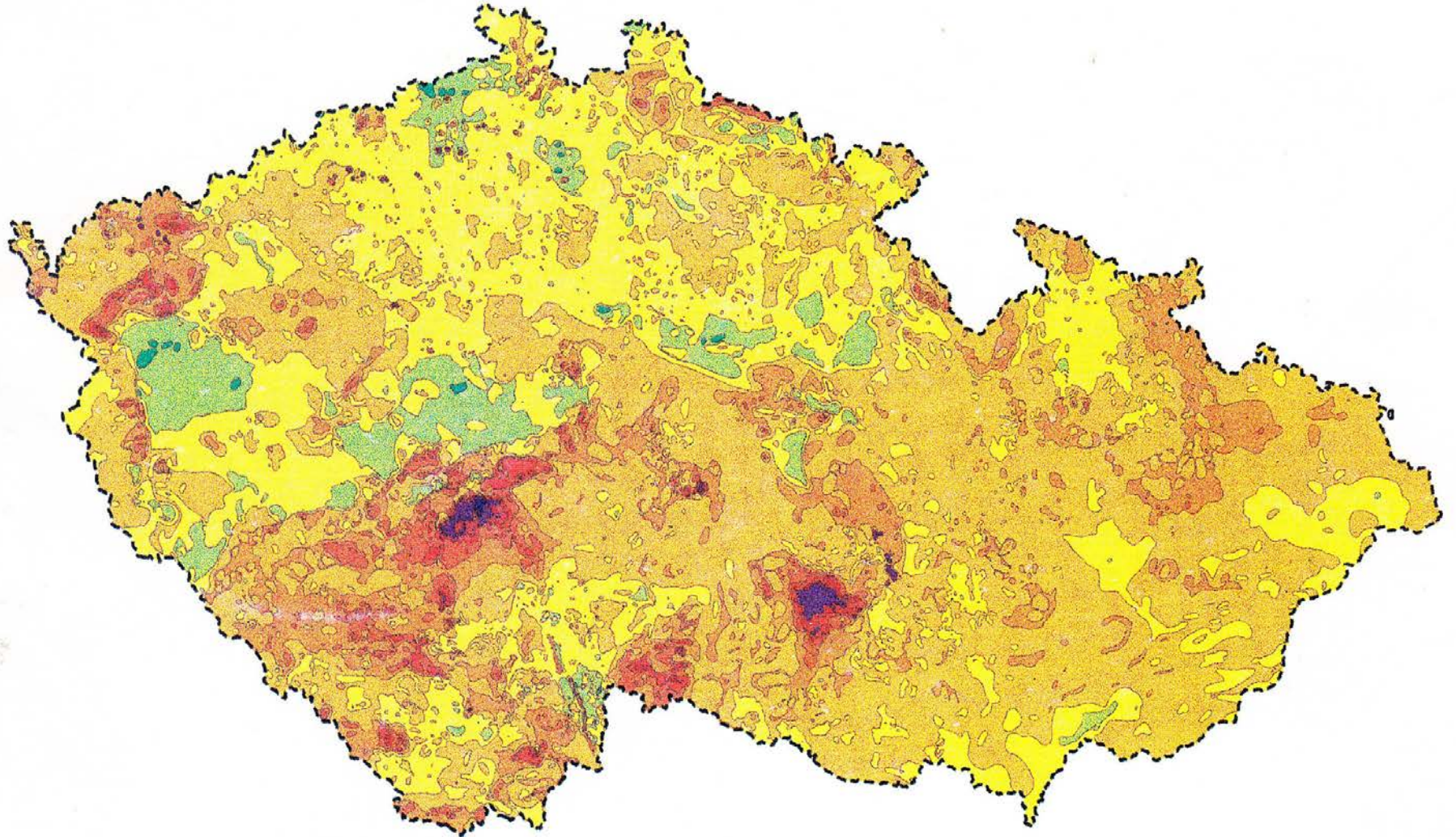
K ochuzení o uran dochází zejména v granulitové facii, která se vyznačuje vysokým poměrem Th/U. Uran může odmigrovat nebo naopak být přinášén hydrotermálními procesy a ovlivnit tak terén s jakoukoli metamorfní facii.

# Radioaktivita rud

- 1 rudní tělesa
- 2 solné aureoly
- 3 vyvřelé horniny
- 4 zóny okolorudních přeměn



# Radioaktivita ČR



# Radioaktivita a životní prostředí

Pro posouzení radioaktivity horninových materiálů z hlediska životního prostředí je významná tzv. aktivita  $A$ . Udává se v becquerelech a je buď hmotnostní ( $\text{Bq/kg}$ ) nebo objemová ( $\text{Bq/m}^3$ )

Převodní vztahy:  $1 \% \text{ K} = 313,00 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$

$1 \text{ ppm U} = 12,35 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$

$1 \text{ ppm Th} = 4,06 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$

Aktivita  $A$  vyjadřuje počet přeměn v daném množství radionuklidu v jednotce času. Kromě této jednotky se používá ještě tzv. dávkový příkon  $D'$ , což je absorbovaná dávka  $D$  energie za jednotku času. Jednotkou je gray za sekundu ( $\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Dávkový příkon záření gama pro geologické účely se vyjadřuje v  $\text{nG}\cdot\text{h}^{-1}$  (nanogray za hodinu).

## Radioaktivita a životní prostředí 2

Převodní vztahy mezi obsahy Th, U a K pro nGy/h:

2,49 nGy/h = 1 ppm Th

5,67 nGy/h = 1 ppm U

13,1 nGy/h = 1 % K

Biologický účinek záření vyjadřuje dávkový ekvivalent H, který je součinem dávky a faktoru biologické účinnosti, tzv. jakostního faktoru. Jednotkou je **sievert Sv**. Za rok obdrží člověk přirozenou dávku 2.5 až 3.0 mSv. Účinek prostředí v Sv lze spočítat z nGy/h, známe-li dobu ozáření a faktor biologické účinnosti. Pro paprsky gama je účinek v Sv roven roven dávkovému příkonu v Gy, pro paprsky alfa je asi 10x až 20x větší.

Kromě přirozené radioaktivity se podílí na zdravotním riziku lokálně i **radioaktivita umělá**, hlavně pozůstatek spadu po havárii elektrárny v Černobylu v r. 1986. Měří se převážně obsah  $^{137}\text{Cs}$  (v Bq/kg. ev. v Bq/m<sup>3</sup>, v terénu i v Bq/m<sup>2</sup>). Mapy distribuce  $^{137}\text{Cs}$  v Jeseníkách, Králickém Sněžníku, Orlických horách, Beskydech, mezi Kolínem a Tábořem a v j. Čechách za posledních 5 let jsou uloženy na MZP.

# Životní prostředí a radon

Zdravotní riziko představují vysoké obsahy radonu, který vzniká přeměnou uranu a thoria v horninách. Radon přísluší ke skupině inertních plynů, chemické sloučeniny nevytváří, hustota je  $9,73 \text{ kg/m}^3$ , je těžší než vzduch. Je zdrojem záření alfa a proto je nebezpečná zejména jeho ingesce (vdechnutí). Ze tří izotopů radonu je nejdůležitější  $^{222} \text{Rn}$ , který vzniká v přeměnové řadě  $^{238} \text{U}$ . Poločas přeměny je 3,82 dne. Radon se šíří zejména v pórovitém prostředí a na tektonických zónách. Obsah radonu se povinně měří při zakládání staveb a pokud je zájem, i uvnitř již existujících staveb.

## Fyziologické působení záření

Působení ionizačního záření na živou tkáň vyjadřuje tzv. ekvivalentní dávka

Ekvivalentní dávka = energetická dávka · činitel efektivity

$$D_q = D_a \cdot q$$

Jednotkou je 1 sievert, 1 Sv

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$$

Činitel efektivity  $q$  je poměr Sv/Gy,

Pro záření  $\gamma$  je  $q = 1$

Pro záření  $\beta$  je  $q = 1$

Pro záření  $\alpha$  je  $q = 20$

Pracovníci vystavení záření v povolání mohou obdržet maximálně 0,05 Sv/rok, pro osoby vystavené záření jen příležitostně je to desetkrát méně.