

Radioaktivní vlastnosti hornin



Martin Chadima
(František Hrouda a Marta Chlupáčová)

AGICO, s.r.o., Brno (chadima@agico.cz)

Geologický ústav AV ČR, v. v. i., Praha



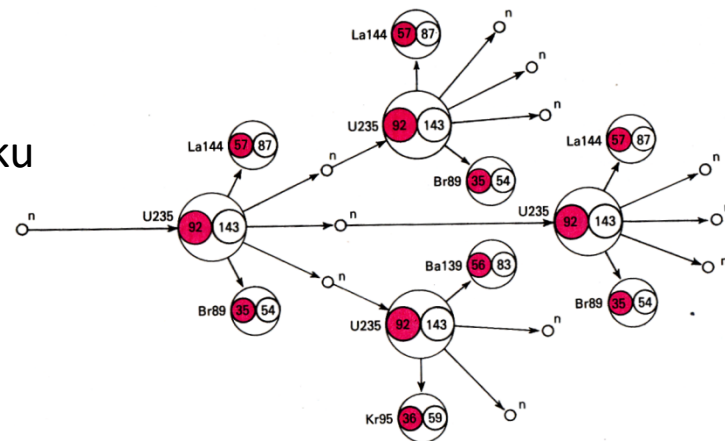
ADVANCED
GEOSCIENCE
INSTRUMENTS
COMPANY



Institute of Geology of the CAS, v. v. i.

Radioaktivní přeměna

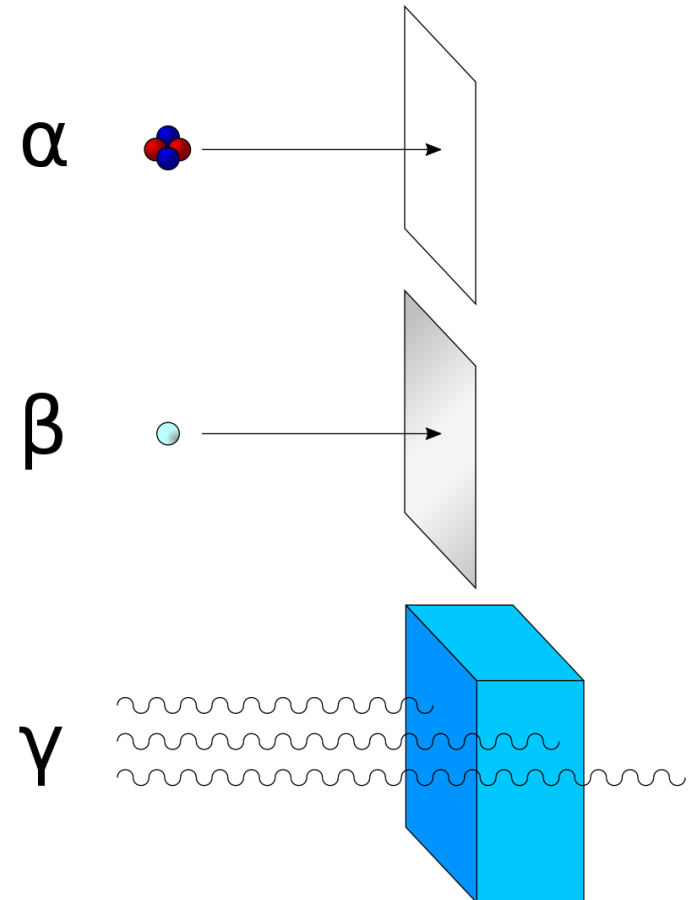
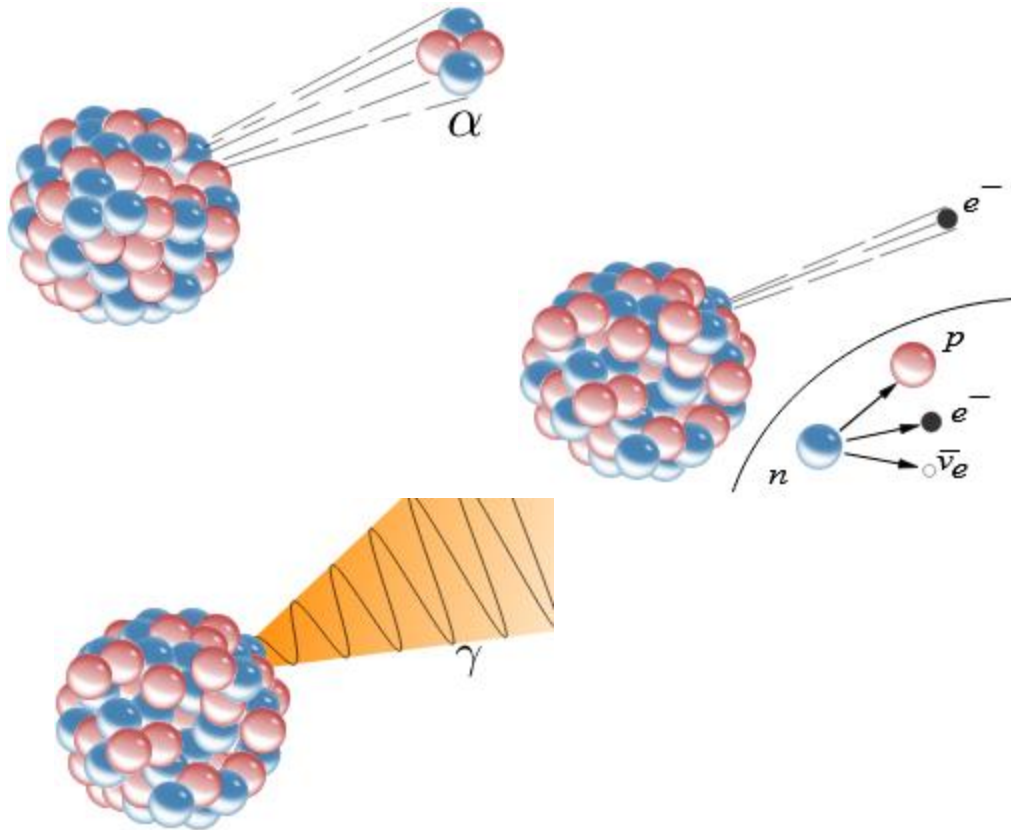
- **Radioaktivita (radioaktivní přeměna)** - vnitřní přeměna složení nebo energetického stavu atomových jader zpravidla spojená s emitováním vysokoenergetické **ionizující záření**
- **Ionizující záření** - souborné označení pro záření, jehož kvanta mají energii na to, aby přímo či nepřímo odtrhovaly (tj. ionizovaly) podél své dráhy elektrony z elektronového obalu atomů
- K radioaktivní přeměně může docházet **spontánním štěpením** u nestabilních radionuklidů nebo **jadernou reakcí** při kolizi s jinou částicí. Může se jednat o štěpnou reakci, při které se jádro po dopadu subatomární částice rozpadne na jádra lehčích prvků, nebo o jadernou fúzi, při které dochází naopak ke slučování lehčích jader
- Radioaktivní rozpad jader atomů **nezávisí na vnějších podmínkách**
- Změní-li se počet protonů v jádře, dojde ke změně prvku



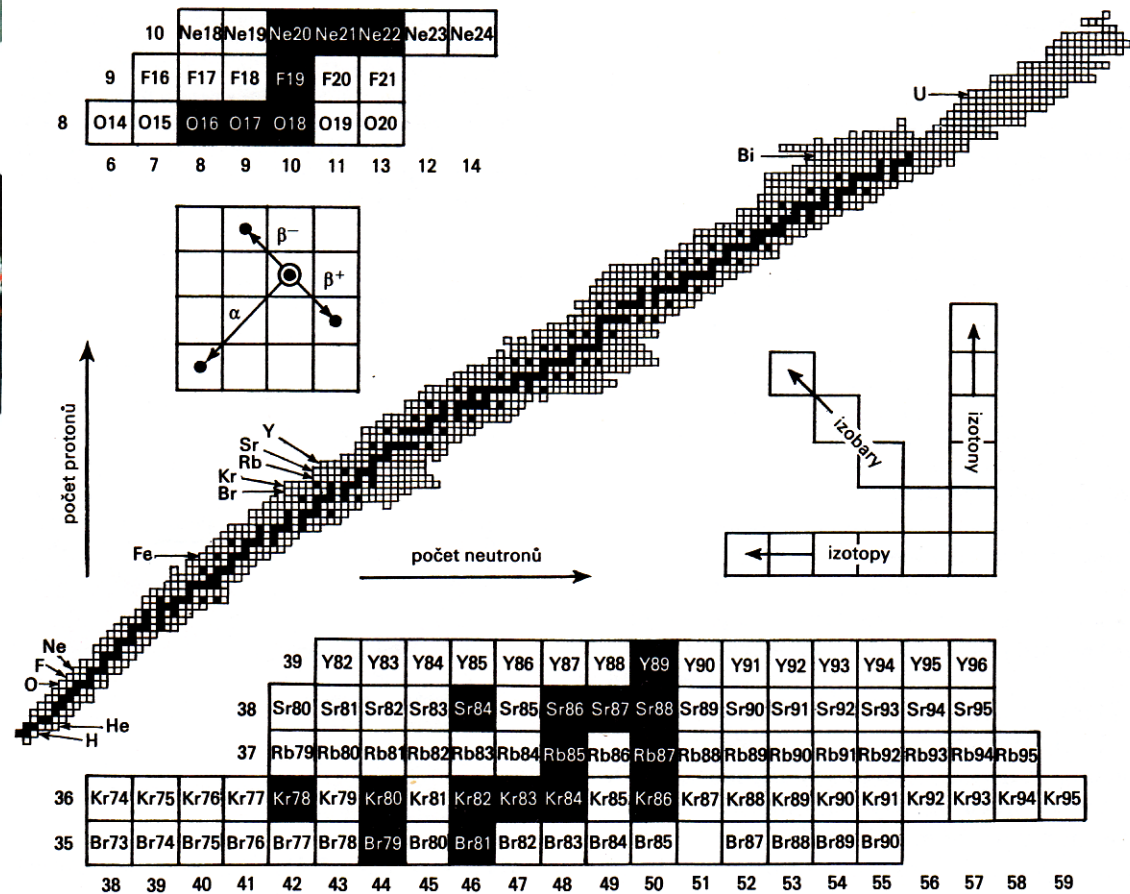
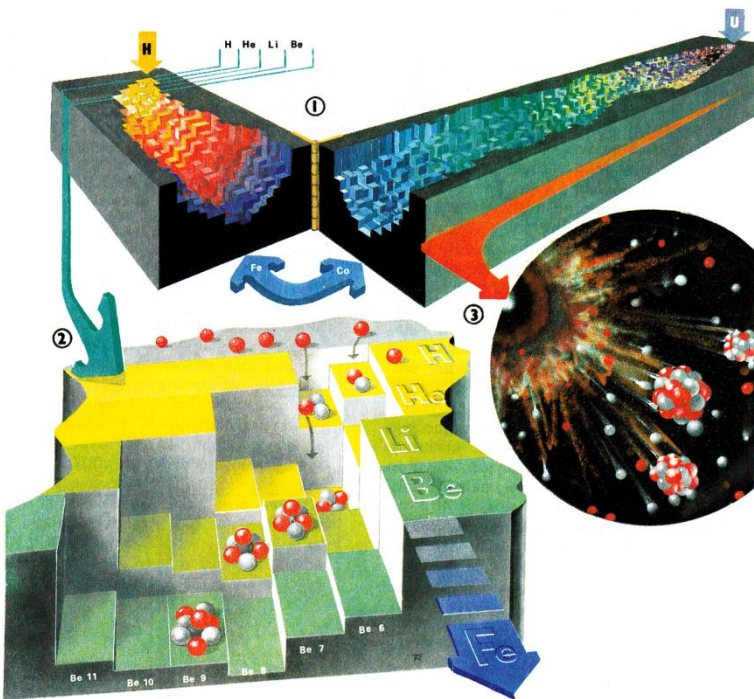
Radioaktivní záření

Jaderné radioaktivní záření:

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



Mapa nuklidů



Rychlost přeměny

Přeměnová konstanta, λ [s^{-1}]

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

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

Poločas přeměny, T

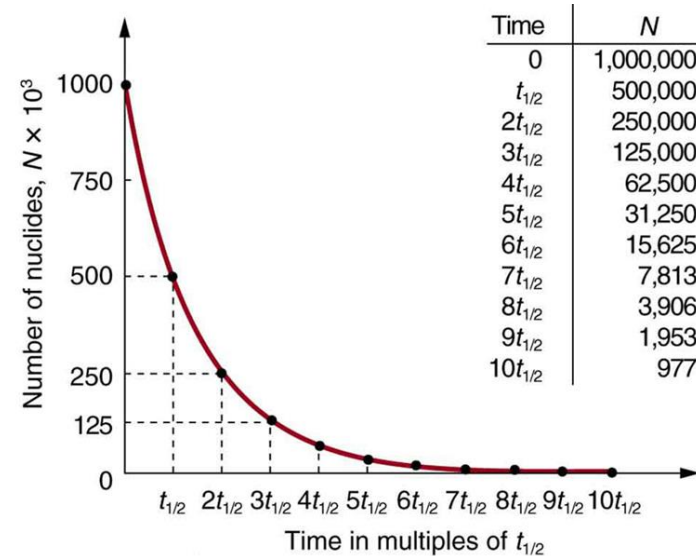
$$T = \ln 2 / \lambda = 0.693 / \lambda$$

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

Střední doba života, τ

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

- $T^{238}\text{U} = 4,51 \cdot 10^9 \text{ yr}$
- $T^{235}\text{U} = 7,02 \cdot 10^8 \text{ yr}$
- $T^{232}\text{Th} = 1,4 \cdot 10^{10} \text{ yr}$
- $T^{40}\text{K} = 1,3 \cdot 10^9 \text{ yr}$



$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0.693}{\lambda} \approx 0.693\tau$$

Radioactive half-life

Radioactive decay constant

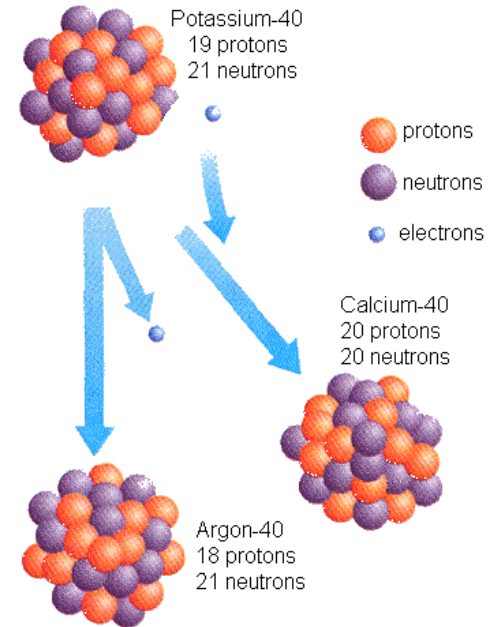
Mean lifetime

Radioaktivita hornin

- **Radioaktivita** hornin je podmíněna přítomností přírodních radionuklidů
- **Primordiální radionuklidy** vznikly při syntéze Země. V procesu jaderné syntézy při utváření Země vznikaly nestabilní izotopy prvků, tj. **radionuklidy**, z nichž ty, které mají poločas přeměny souměřitelný se stářím Země, se zachovaly a nacházíme je v horninách
- V horninách se nachází > 20 primordiálních radionuklidů
- Z hlediska jejich obsahu a intensity emise jaderného záření jsou podstatné a snadno měřitelné jen tři: **K, U, Th**
- Uran a thorium jsou mateřskými prvky tří přírodních přeměnových řad ^{238}U , ^{235}U a ^{232}Th , jejichž členy jsou zdroji jaderného záření
- Vyhledávání nerostných (radioaktivních) surovin, základní geologický výzkum, hodnocení radioaktivity životního prostředí.

Draslík

- Draslík má 3 izotopy (^{39}K 93,26 %, ^{40}K 0,012 %, ^{41}K 6,73 %), z nichž pouze izotop ^{40}K je radioaktivní.
- ^{40}K je zastoupený v přirozené směsi izotopů draslíku pouze 0,012 %
- ^{40}K se přeměňuje beta přeměnou s emisí záření beta, kdy produktem přeměny je ^{40}Ca
- Záchytem elektronu s emisí záření gama, kdy produktem přeměny je ^{40}Ar
- Poměr obou přeměn je konstantní
- ^{40}K je zdrojem záření β a γ , záření gama má energii 1,461 MeV
- Přítomnost draslíku v horninách (všech izotopů K sumárně) se v geovědách uvádí v hmotnostní koncentraci a vyjadřuje se v %. 1 % K = 10 mg K/1 g horniny = 10 g K/1 kg.



Uran a Thorium

- **Uran** má 3 izotopy (^{238}U 99,274 %, ^{234}U 0,006 % a ^{235}U 0,720 %)
- ^{238}U a ^{235}U vytváří samostatně přírodní **přeměnové řady**, jejíž radionuklidy jsou zdrojem záření α , β a γ
- Poměr obou uranových izotopů je v přírodě konstantní
- ^{238}U je zásadním zdrojem radiace uranu v horninách

- **Thorium** má velký počet izotopů
- ^{232}Th o dlouhém poločasu přeměny vytváří přírodní přeměnovou řadu, jejíž radionuklidy jsou zdrojem záření α , β a γ
- Obsahy U a Th v horninách se v geovědách uvádějí v hmotnostní koncentraci a vyjadřují se v jednotkách ppm (parts per million). 1 ppm = 1 μg /1 g horniny = 1 mg/kg.

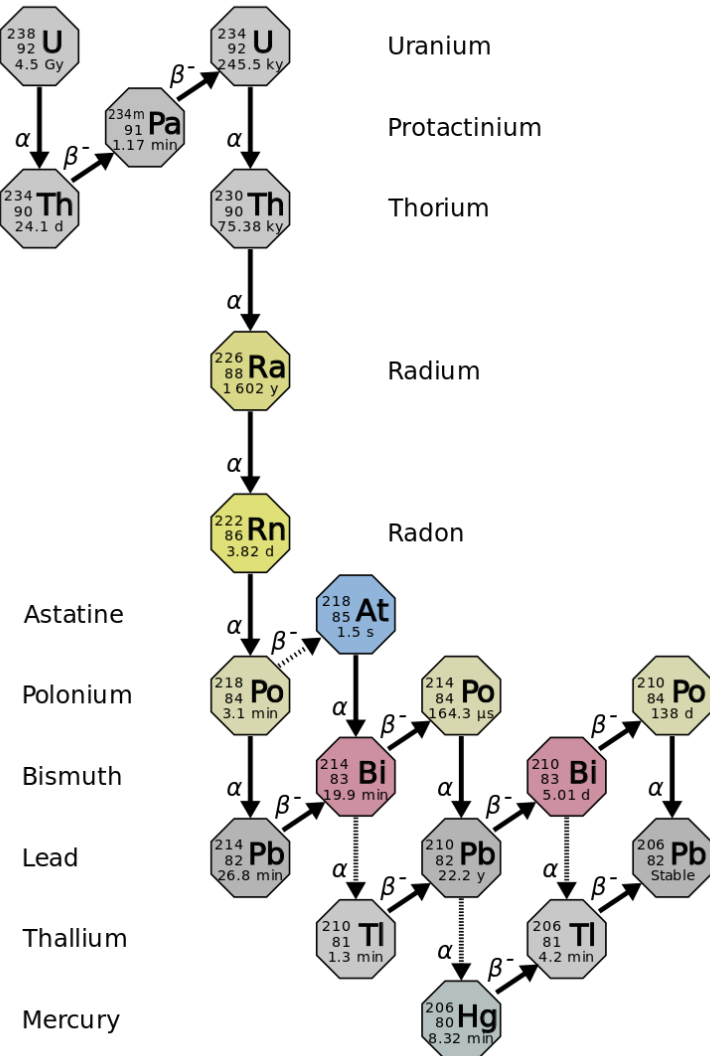
Přeměnové řady

1. uranová – ^{238}U , končí olovem ^{206}Pb . Nejdůležitější členy řady: radium ^{226}Ra , radon ^{222}Rn . $^{238}\text{U} / ^{226}\text{Ra} = 1 : 3,4 \cdot 10^{-7}$
 2. actiniová – ^{235}U , končí olovem ^{207}Pb
 3. thoriová – ^{232}Th , končí olovem ^{208}Pb
- Radionuklidy přírodních přeměnových řad emitují jaderné záření, jehož energie je pro jednotlivé radionuklidy charakteristická
 - Měřením a stanovením energií záření lze jednotlivé radionuklidy určit
 - Přibližně uprostřed každé přeměnové řady jsou generovány izotopy radioaktivního plynu **radonu**. Koncové produkty přeměny v přeměnových řadách jsou stabilní izotopy olova: ^{206}Pb , ^{207}Pb a ^{208}Pb
 - Využití v geologii: stanovení absolutního stáří
 - Metody K-Ar, Ar-Ar, $^{238}\text{U} - ^{206}\text{Pb}$, $^{235}\text{U} - ^{207}\text{Pb}$, $^{232}\text{Th} - ^{208}\text{Pb}$, $^{206}\text{Pb} - ^{207}\text{Pb}$, $^{206}\text{Pb} - ^{208}\text{Pb}$.

Přeměnové řady

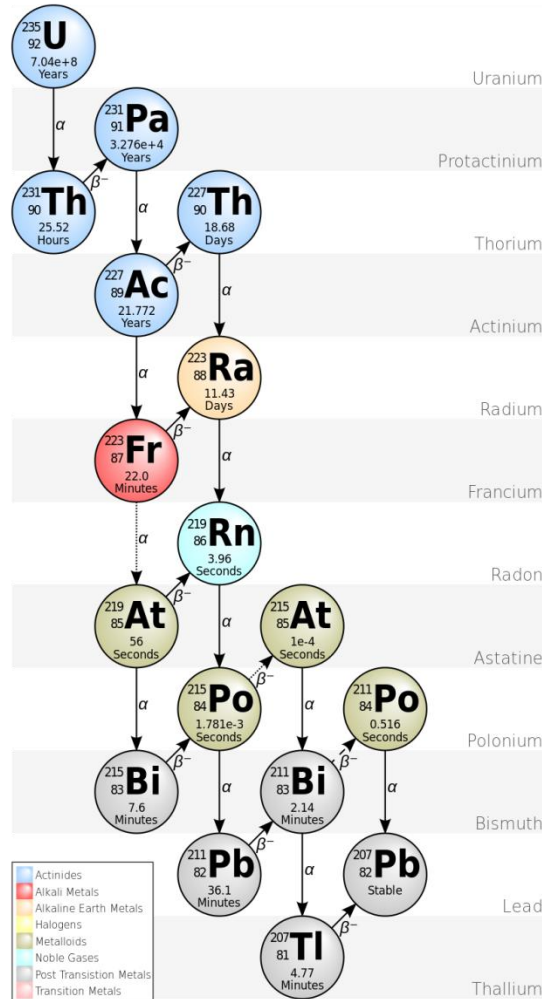
Uranová ^{238}U

- končí olovem ^{206}Pb
- nejdůležitější členy řady: radium ^{226}Ra , radon ^{222}Rn . $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra} = 1 : 3,4 \cdot 10^{-7}$



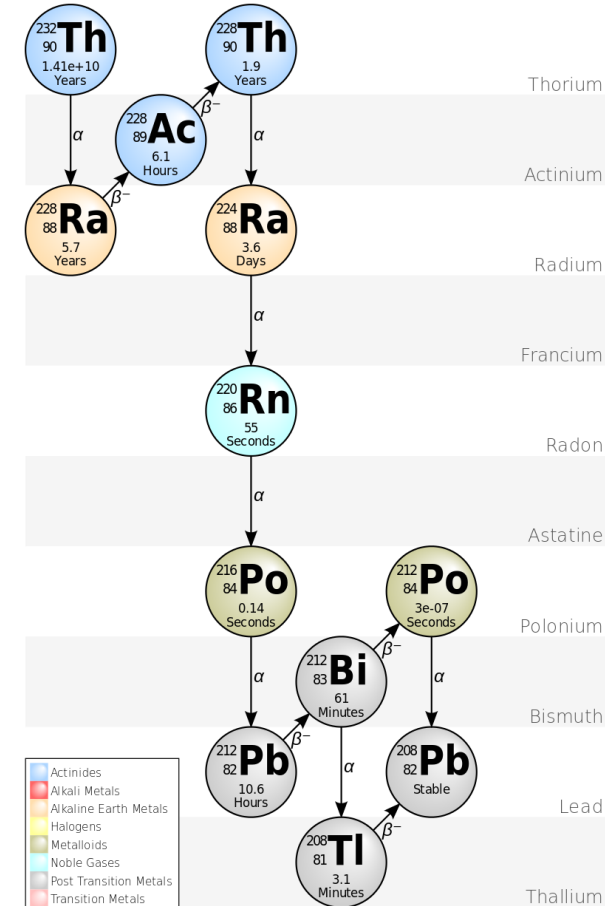
Actiniová ^{235}U

- končí olovem ^{207}Pb



Thoriová ^{232}Th

- končí olovem ^{208}Pb



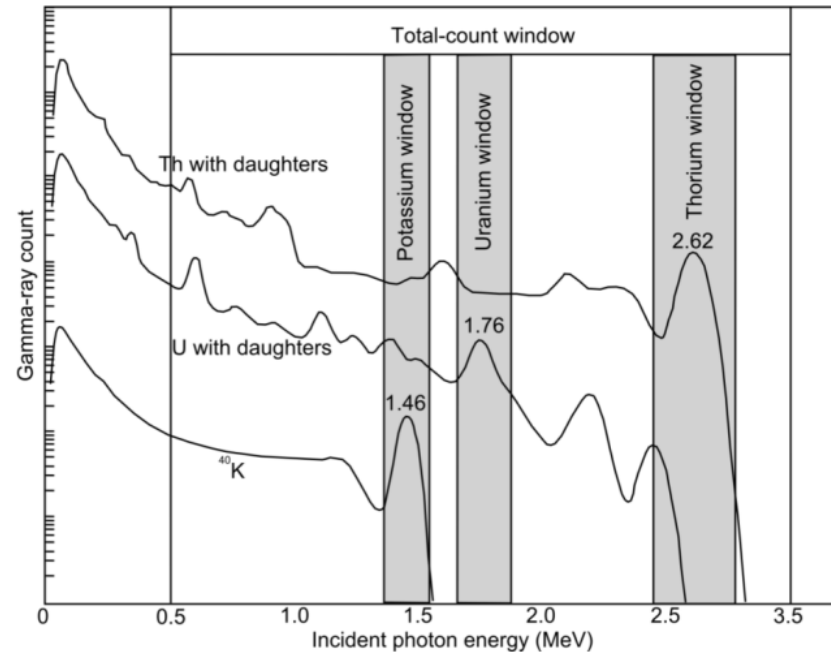
Měření radioaktivity

- Terénní spektrometrie
- Letecká spektrometrie
- Automobilové spektrometrii



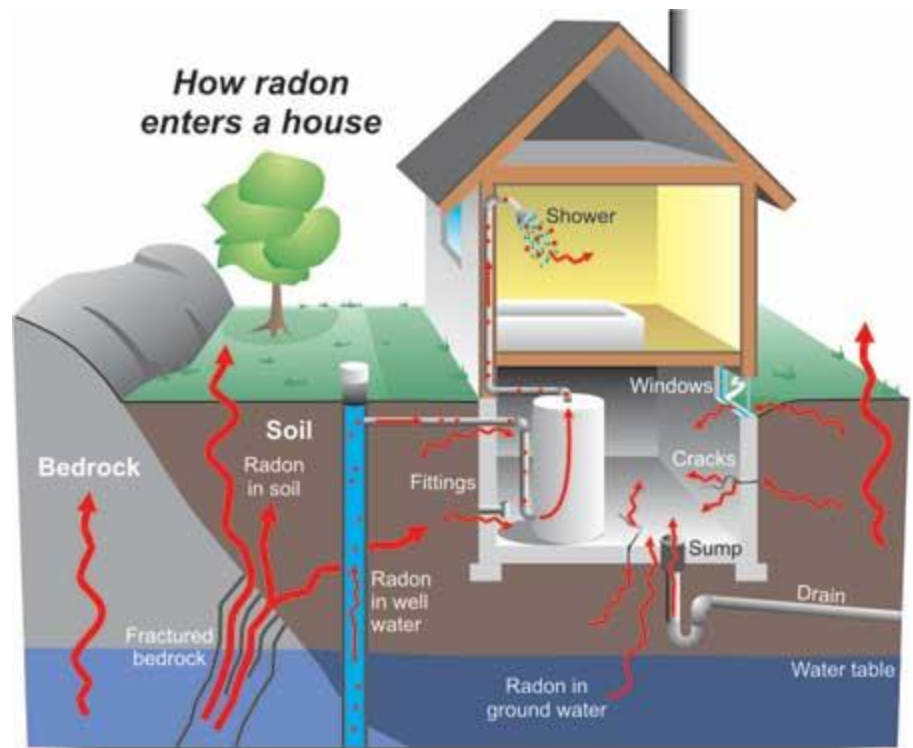
Měření radioaktivity

- 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 NaI(Tl), příp. GeLi, nejnověji krystaly s W a jiné.
- **Obsahy U a Th se udávají v ppm, obsah K v hm. %.**
- Přesnější než stanovení vlastního U je stanovení eU (resp. U_{Ra}) podle energetických píků Ra, Bi aj.
- Jaderný spad z jaderné elektrárny v Černobylu z r. 1986, lze dosud indikovat podle zvýšené radioaktivity ^{137}Cs , které se projevuje ve spektrometrii na píku 662 keV.



Měření radioaktivity

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



Produkce tepla

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

- 1% K: $3,58 \cdot 10^{-12} \text{ W.g}^{-1}$
- 1 ppm U: $9,7 \cdot 10^{-8} \text{ W.g}^{-1}$
- 1 ppm Th: $2,7 \cdot 10^{-8} \text{ W.g}^{-1}$

Tepelná produkce na m^3 objemu horniny za jednotku času je dána vztahem

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

D je hustota v 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 (K)** má vysoký obsah v draselných živcích, v minerálech leucitu a nefelinu a ve slídách jako jsou biotit, muskovit, sericit a flogopit. Draslík je v horninovém prostředí mobilní.
- **Uran (U)** má četné geochemické formy přítomnosti v horninách. Podle chemického složení vytváří oxidy, silikáty, vanadáty, fosfáty, arsenáty, karbonáty, sulfáty, molybdáty a jiné sloučeniny. Uranové minerály se vyskytují jako primární (vznikly krystalizací, např. uraninit) a sekundární (vznikly oxidací primárních minerálů, např. autunit). Z hlediska přítomnosti v minerálech uran vytváří samostatné minerály (uraninit, smolinec) nebo je izomorfně přítomen v jiných minerálech (např. v zirkonu, monazitu, xenotimu, apatitu a j.). Uran čtyřvalentní je geochemicky stálý, uran šestivalentní je rozpustný. Vzhledem k rozpustnosti šestivalentního uranu je uran v horninovém prostředí mobilní.
- **Thorium (Th)** má rovněž četné a složité geochemické formy přítomnosti v horninách. Minerály s obsahem Th jsou např. zirkon, monazit, xenotim, apatit, alanit, epidot a j. Thorium je v horninovém prostředí relativně stálé.

Radioaktivita magmatických hornin

- Magmatické horniny vznikají tuhnutím magmatu za tvorby silikátových minerálů.
- V první fázi magmatické diferenciace za vysokých teplot převážně krystalizují mafické (tmavé) minerály bohaté na Fe a Mg, a chudé na Al, Si, Na a K. Mafické minerály převážně nejsou nositeli radioaktivních prvků.
- V koncové fázi magmatické diferenciace se tvoří minerály s větší komponentou Si a Al. Draslík je významnou součástí tvorby Al-Si základních minerálů pozdní fáze magmatické diferenciace, zatímco uran a thorium se koncentrují v minoritních a akcesorických minerálech.
- Radioaktivita magmatických hornin obvykle roste s obsahem SiO_2 (kyselostí magmatických hornin). Kyselé magmatity (např. granity) vykazují vyšší radioaktivitu než bazické magmatity (např. gabro).
- Chemické a mechanické větrání magmatických hornin vede k separaci minerálů a oddělení akcesorických minerálů obsahujících U a Th. Jsou to zejména titanit, apatit, zirkon, xenotim, monazit a ortit.
- Produkty větrání magmatitů jsou písčité složka (minerály o nízké radioaktivitě), jílové minerály (jsou nositeli K a dalších radioaktivních prvků) a akcesorické minerály (se zvýšenými obsahy U a Th).

Radioaktivita sedimentárních hornin

- Sedimentární horniny jsou v jednotlivých litologických typech k obsahům přírodních radionuklidů K, U a Th specifické.
- Obecně platí, že radioaktivita sedimentů roste s obsahem jílovitých minerálů. Jílovce mají vysoký obsah jílových minerálů s vysokým obsahem K. Jílovce mohou vázat další radioaktivní prvky a v případě obohacení organickou substancí též U.
- Pískovce převážně sestávají ze zrn kvarcitu (neradioaktivní) a zrn živců (draselné živce mají vysoký obsah K). Arkózy jsou sedimenty o vysokém obsahu zrn živců (převážně radioaktivní komponenty).
- Karbonáty (vápenaté sedimenty) vápence a dolomity, mají převážně nízké obsahy K (rozpustný) a Th, zatímco tvorba karbonátů v mořském prostředí za podmínek přítomnosti organické substance váže U.
- Uran může nahrazovat vápník nebo být adsorbován fosfáty. Fosfáty mají vysoké obsahy uranu 50 – 300 ppm U (severní Afrika, severní Amerika a j.).
- Vysoce radioaktivní plážové písky obsahující těžké kovy v nerozpustných sloučeninách akumulovaných gravitační sedimentací. Obsahují monazit s vysokou koncentrací Th a též U. Těžké kovy dodávají plážovým pískům černou barvu, monazit sám je světlý.
- Vysoce radioaktivní černé břidlice (Alum shale) pozdně kambrického stáří v Norsku a Švédsku a graptolitové jílovité břidlice v Estonsku

Radioaktivita metamorfovaných hornin

- Metamorfované horniny (přeměněné horniny) vznikly rekrystalizací původních horninových mas za daných podmínek teploty a tlaku.
- Radioaktivita metamorfovaných hornin je v širokém intervalu hodnot, převážně odpovídá radioaktivitě výchozího horninového materiálu.
- Změna radioaktivity metamorfovaných hornin nastává převážně za vysokých tlaků a teplot regionální metamorfosy, kdy jsou předpokládány pohyby všech tří radioaktivních prvků K, U a Th.
- Migmatity jsou horniny, které vznikají injekční metamorfózou převážně pararul. Za přínosu křemenného metatektu (fluidní injekční složky vnikající do horniny) se radioaktivita původní horniny snižuje, za přínosu draselného metatektu radioaktivita migmatitu roste.

Typické koncentrace radionuklidů v horninách

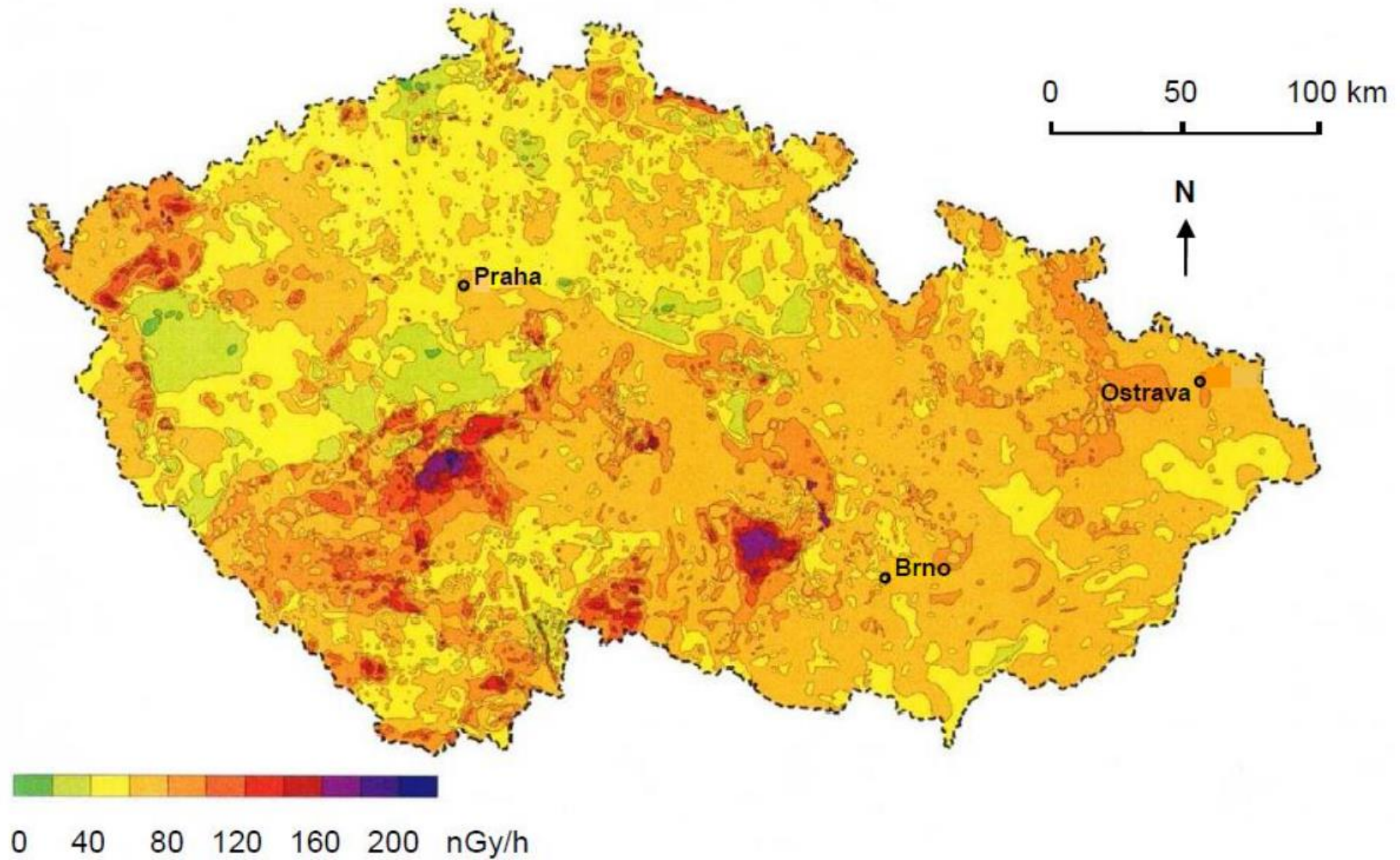
Hornina	K [hm%]	U [ppm]	Th [ppm]	Th/U
Bazické magmatity	0,5	1,0	3,0	3
Středně kyselé magmatity	1,8	2,3	9,0	4
Kyselé magmatity	4,0	4,5	25,0	5
Písčité sedimenty	1,4	1,5	5,5	4
Jílovité sedimenty	2,7	4,0	16,0	4
Vápence	0,7	2,0	2,0	1
Černé břidlice	2,7	8,0	16,0	2
Amfibolity	0,8	1,2	3,3	3

- Obvyklé koncentrace přírodních radionuklidů v horninách jsou v mezích 0 – 5 % K, 0 – 12 ppm U, 0 – 50 ppm Th, kterým odpovídají dávkové příkony záření gama v mezích 5 – 300 nGy/h nejčastěji.
- Změnu obsahů radionuklidů a radioaktivitu hornin může podmínit pohyb přírodních radionuklidů v důsledku jejich rozpustnosti, chemické změny, migrace radonu, přenos mechanických částic větrem a vodou a redepozice horninových materiálů.

Uranová mineralizace

- V Českém masívu se nachází uranová ložiska endogenního hydrotermálního typu a exogenní epigenetická U ložiska
- **Endogenní uranová ložiska** jsou převážně spjata s plutony (magmatická hlubinná tělesa) a náleží ke křemito-paragenetické formaci s minerálními asociacemi křemen – karbonáty – uraninit, nebo křemen – fluorit – uraninit a k sulfidické paragenetické formaci s minerálními asociacemi sulfidy – uraninit a prvkovou asociací Ag-Bi-Co-Ni-As-U.
- **Exogenní uranová mineralizace** a exogenní ložiska uranu se nachází v platformním pokryvu Českého masívu. Syngenetické akumulace uranu v uhelných vrstvách a polohách jílu permo-karbónských pánví (prvohory) mají často prvkové asociace U-Pb-Zn-Cu-Mo-(V).
- Epigenetické akumulace uranu v ložiskách uhlí vnitrosudetské pánve podmiňují zvýšenou radiaci uhelných hald a produktů jejich spalování.
- Významná uranová mineralizace v sedimentech české křídové pánve je vyvinuta v horninách cenomanu (druhohory, křída) v nadloží hranice s krystalinikem, které je zvažováno jako zdroj uvolněného uranu. Charakteristickým znakem uranové mineralizace na ložiskách Stráž a Hamr je vazba uranu v sedimentech na organické substance a na pyrit.

Radiometrická mapa 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 (Bq/kg) nebo objemová (Bq/m³)

Převodní vztahy

- 1 % K = 313,00 Bq . kg⁻¹
- 1 ppm U = 12,35 Bq . kg⁻¹
- 1 ppm Th = 4,06 Bq . kg⁻¹

Aktivita A vyjadřuje **počet přeměn v daném množství radionuklidu v jednotce času**.

Radioaktivita a životní prostředí

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

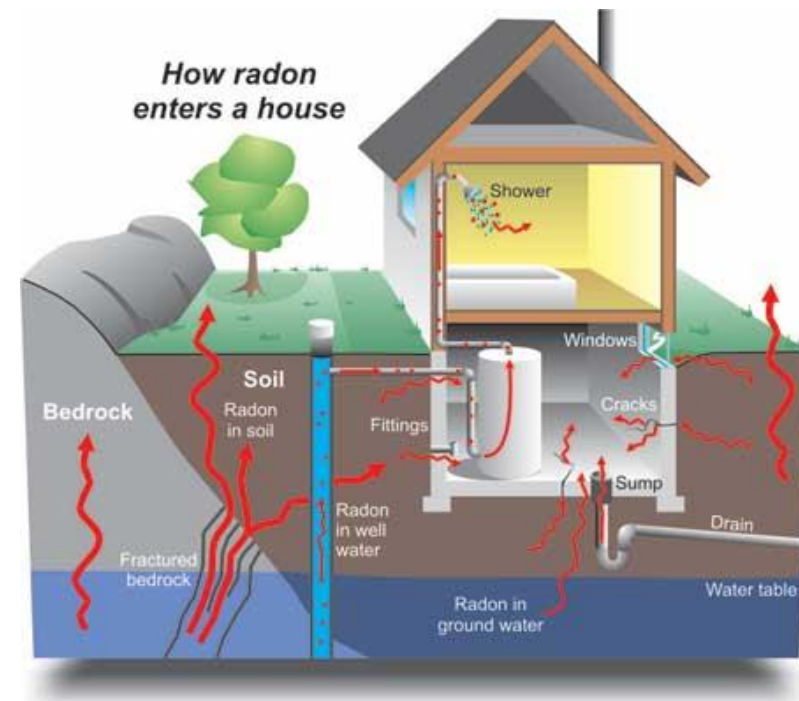
- $2,49 \text{ nGy}/\text{h} = 1 \text{ ppm Th}$
- $5,67 \text{ nGy}/\text{h} = 1 \text{ ppm U}$
- $13,1 \text{ nGy}/\text{h} = 1 \% \text{ K}$

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}Cs (v Bq/kg . ev. v Bq/m^3 , v terénu i v Bq/m^2).

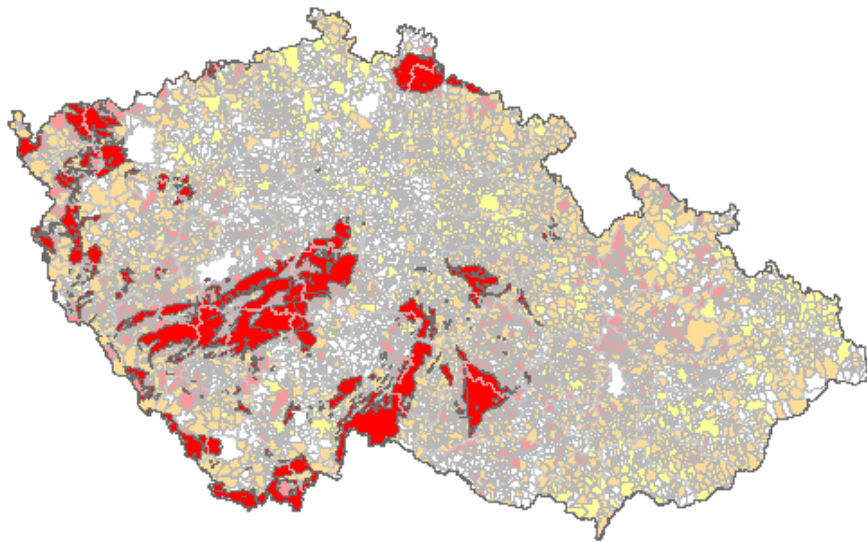
Životní prostředí a radon

- 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

Horniny žulového charakteru



Úroveň radonu v objektech

