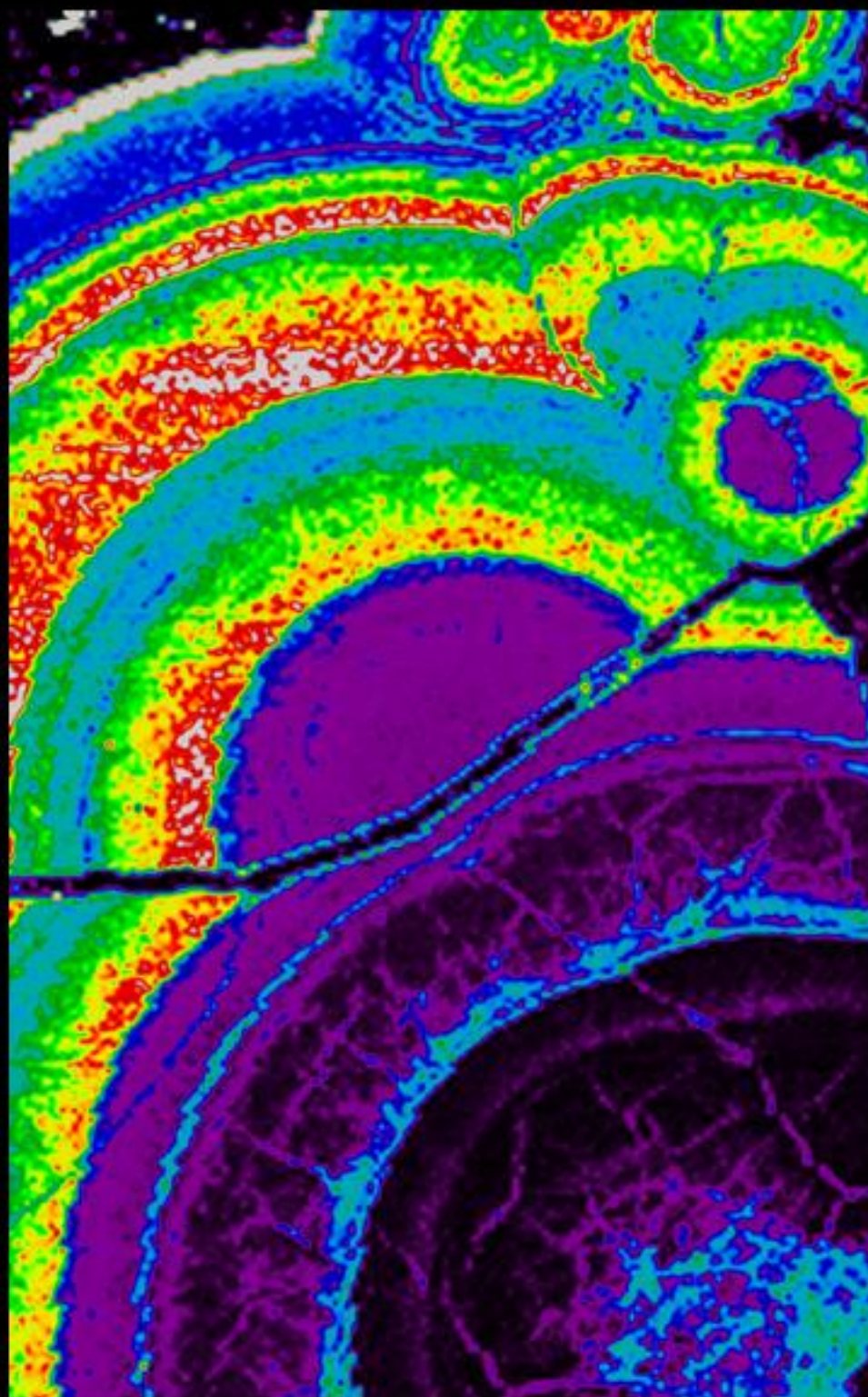


CESTY URANU

ANEB KDYŽ GEOLOG POTKÁ CHEMIKA
V "GEOBARRU"



Vojtěch Wertich
Markéta Holá
Martin Kubeš
Jaromír Leichmann
Petr Navrátil
Kateřina Zachovalová

Ústav geologických věd
Ústav chemie

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
MASARYKOVA UNIVERZITA

**CESTY URANU
ANEB KDYŽ GEOLOG POTKÁ CHEMIKA V „GEOBARRU“**

MUNI
PRESS

MUNI
SCI

Tato publikace vznikla za podpory projektu
Dlouhodobý výzkum geochemických bariér pro ukládání radioaktivního odpadu,
reg. č. CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_026/0008459.



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

MUNI
SCI



SÚRAO | SPRÁVA ÚLOŽIŠŤ
RADIOAKTIVNÍCH
ODPADŮ

© 2023 Masarykova univerzita

ISBN 978-80-280-0319-7

ISBN 978-80-280-0319-7 (on-line ; pdf)

CESTY URANU ANEŽ KDYŽ GEOLOG POTKÁ CHEMIKA V „GEOBARRU“

Obrazová publikace prezentující vybrané výsledky projektu „GeoBarr“.

Autoři

Vojtěch Wertich

Ústav geologických věd PŘF MU

Markéta Holá

Ústav chemie PŘF MU

Martin Kubeš

Ústav geologických věd PŘF MU

Jaromír Leichmann

Ústav geologických věd PŘF MU

Petr Navrátil

DIAMO, státní podnik

Kateřina Zachovalová

Ústav geologických věd PŘF MU

CESTY URANU

aneb když geolog potká chemika v „GEOBARRU“

Obrazová publikace prezentuje vybrané výsledky projektu OP VVV Dlouhodobý výzkum geochemických bariér pro ukládání radioaktivního odpadu (GeoBarr), reg. č. CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_026/0008459, řešeného na Přírodovědecké fakultě Masarykovy univerzity ve spolupráci se státním podnikem DIAMO a Správou úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO). Cílem projektu je objasnit chování a mobilitu uranu při vzniku uranových ložisek a dosažené výsledky následně aplikovat na koncept výběru místa a výstavby bezpečného úložiště vyhořelého jaderného paliva. Základní premisa totiž spočívá v podobnosti uranové rudy – uraninitu a vyhořelého jaderného paliva.

V rámci projektu jsme se zabývali zjišťováním podmínek a závislostí, které způsobily migraci uranu, jeho vysrážení a nahromadění ve formě ložisek nerostných surovin, kde uran zůstal nemobilní, vázaný přírodními bariérami po dobu více než 250 mil. let. Právě tyto poznatky mohou být vhodné pro řešení systému bariér v plánovaném hlubinném úložišti vyhořelého jaderného paliva.

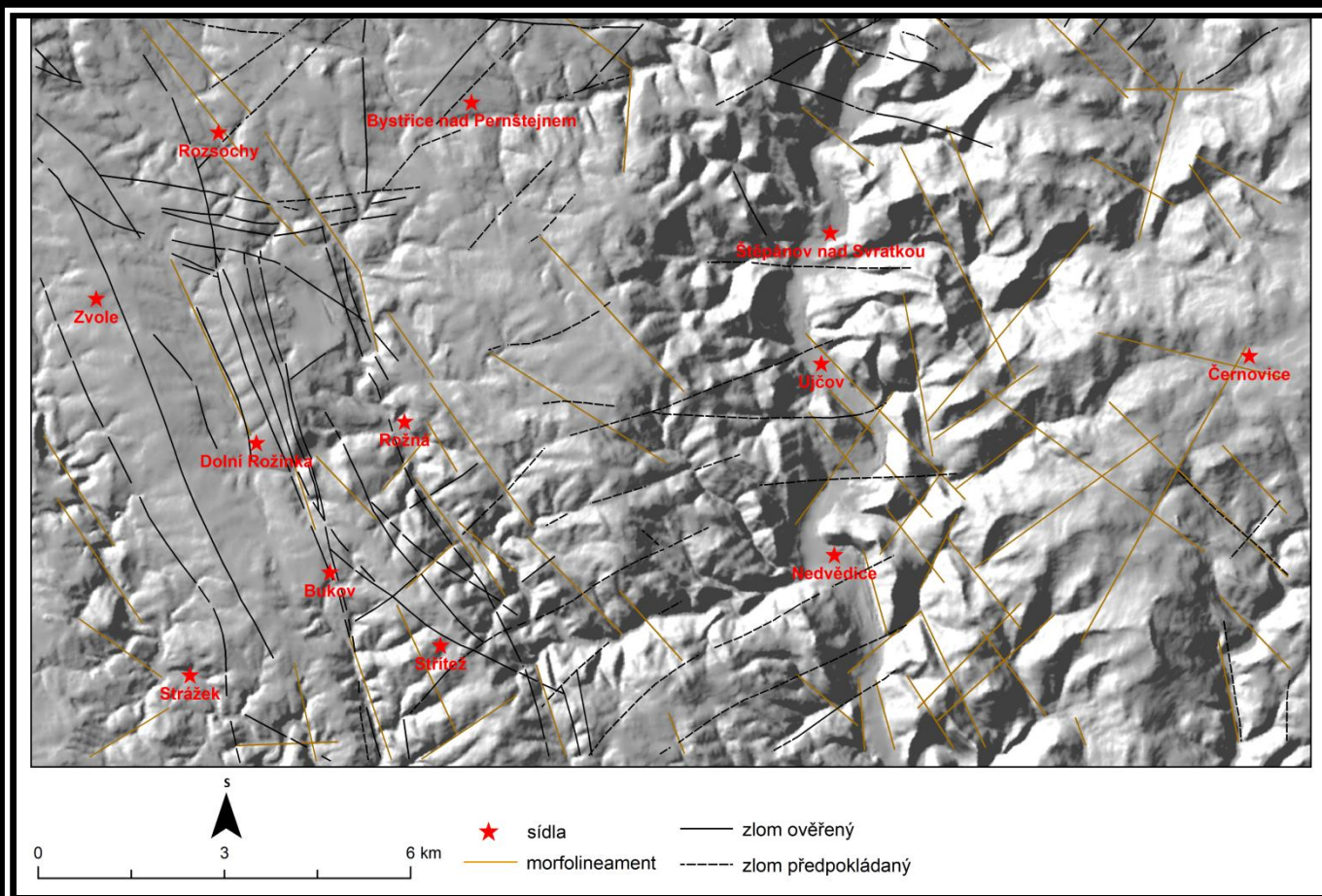
Obrazová publikace představuje uran od geologického makroměřítká, jako je jeho dobývání v ložisku Rožná, těžní věže a dobývky, přes mikrosvět mineralogicko-chemický a izotopický až po jeho uložení ve formě energeticky využitého jaderného paliva zpět do horninového prostředí.



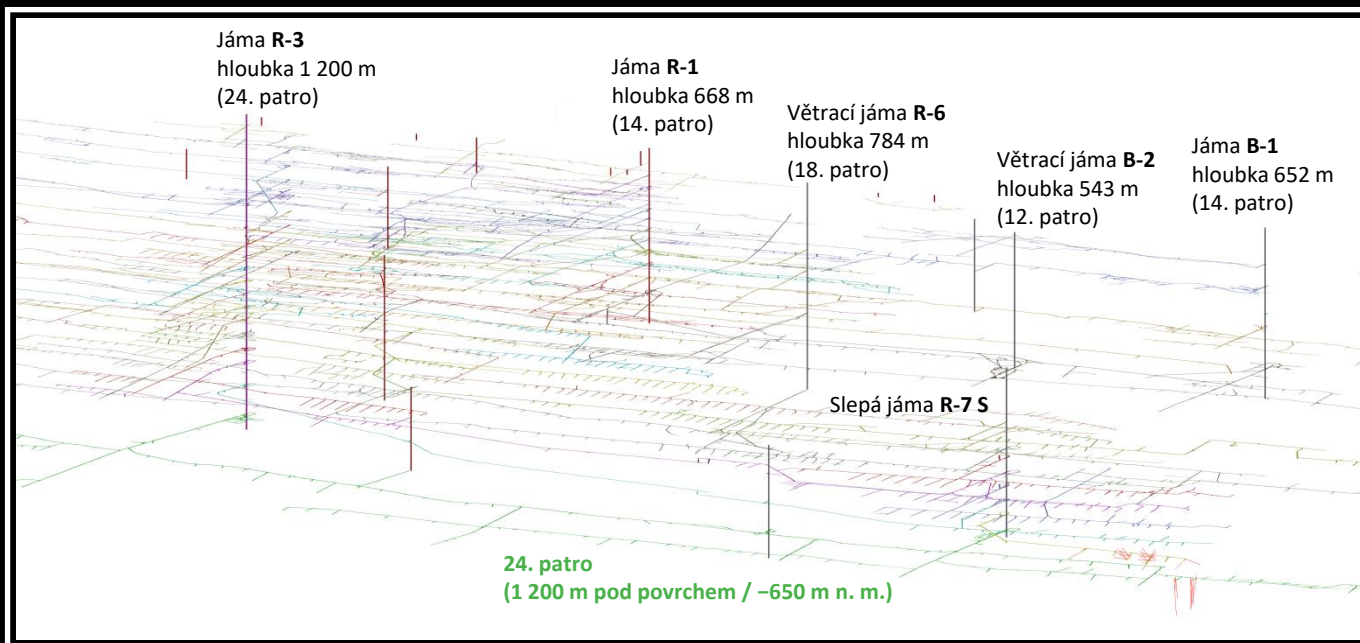
Letecký snímek zachycuje obec Rožná (kraj Vysočina, poblíž Bystřice nad Pernštejnem) a severní část stejnojmenného uranového ložiska. V levé horní části fotografie se nachází důlní závod s těžní věží R1 a haldami hlušinového materiálu (bez ekonomicky využitelného obsahu uranu). V pravé horní části je pak vidět těžní věž R3 a odkaliště, kde se ukládá zbytkový materiál po finální úpravě uranové rudy. Fotografie: archiv DIAMO o. z. GEAM Dolní Rožinka.



Věž první těžní jámy R1 na ložisku Rožná. Hloubení této jámy začalo v roce 1957. Bylo dosaženo hloubky 668 metrů na úrovni 14. důlního patra. Po většinu doby aktivní těžby, která skončila v roce 2016, sloužila R1 jako hlavní těžní jáma.
Fotografie: archiv DIAMO o. z. GEAM Dolní Rožínka.



Mapa znázorňuje průběh morfolineamentů a zlomů v širším okolí ložiska Rožná. Morfolineamenty jsou významné linie v reliéfu krajiny, které představují zřetězení tvarů reliéfu, jako jsou přímé úseky údolí, sedla, přímočaré výrazné svahy nebo hřbetnice. Morfolineamenty poukazují na strukturně geologický základ, který se do reliéfu promítá buď pasivně (vypreparováním podpovrchových struktur erozí), nebo aktivně (deformací zemské kůry tektonickými procesy). Morfolineamenty jsou extrémně důležité jak pro možné cesty migrace uranu, tak pro vznik ložisek či vyhledávání vhodného místa pro hlubinné úložiště.



3D model důlních děl ložiska Rožná. Důl má celkem 24 důlních pater, nejhlubší 24. patro dosahuje hloubky až 1 200 m pod povrchem (tj. -650 m n. m.). Za celou dobu těžby (1957–2016) bylo vyraženo přes 500 km horizontálních a téměř 100 km vertikálních důlních děl. Celková produkce dolu přesáhla 20 000 tun uranu. 3D vizualizace uranového dolu – VlK, Jan (DIAMO o. z. GEAM), 3D model upraven v rámci projektu GeoBarr.



Vertikální jámy (šachty) dopravují rudu, osoby a potřebný materiál na jednotlivá patra, kde transport v horizontální rovině probíhá s využitím kolejové dopravy důlními vlaky. Na snímku vozovna důlních lokomotiv na 12. patře (cca 500 m pod povrchem).

Fotograf: Martin Přibíl. Fotografie: archiv DIAMO o. z. GEAM Dolní Rožínka.

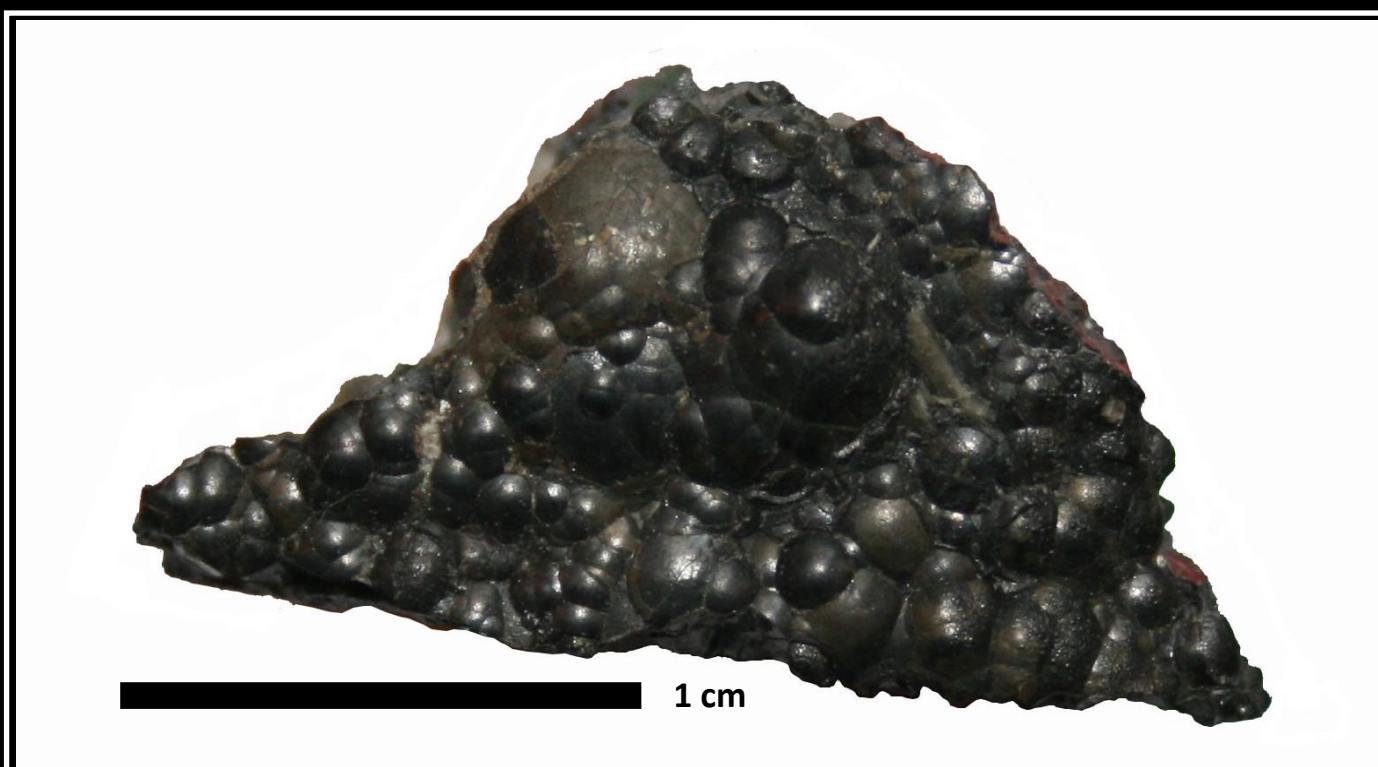


Páteční štoly s kolejovou dopravou vedou k jednotlivým dobývkám (viz foto), které jsou navrženy tak, aby protnuly uranové zrudnění v horninovém masivu.

Fotograf: Martin Přibíl. Fotografie: archiv DIAMO o. z. GEAM Dolní Rožínka.

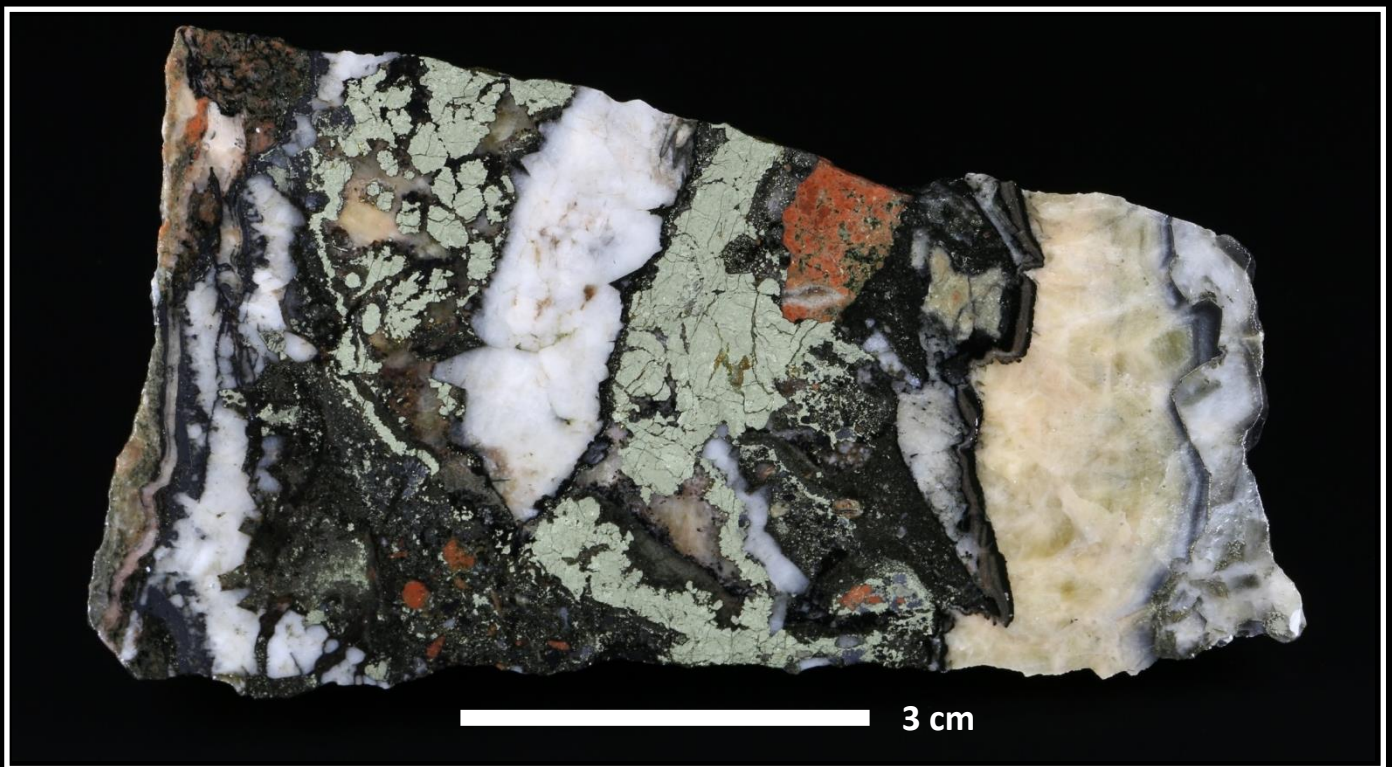


Vzorek uranové rudy. Typický vývin nízkoteplotního hydrotermálního uraninitu (UO_2) je charakteristický nápadnými ledvinitými agregáty černé barvy s polokovovým leskem. Vzorek pochází z ložiska Petrovice u Nového Města na Moravě a byl zapůjčen ze sbírek Moravského zemského muzea. Fotografie: archiv projektu GeoBarr.

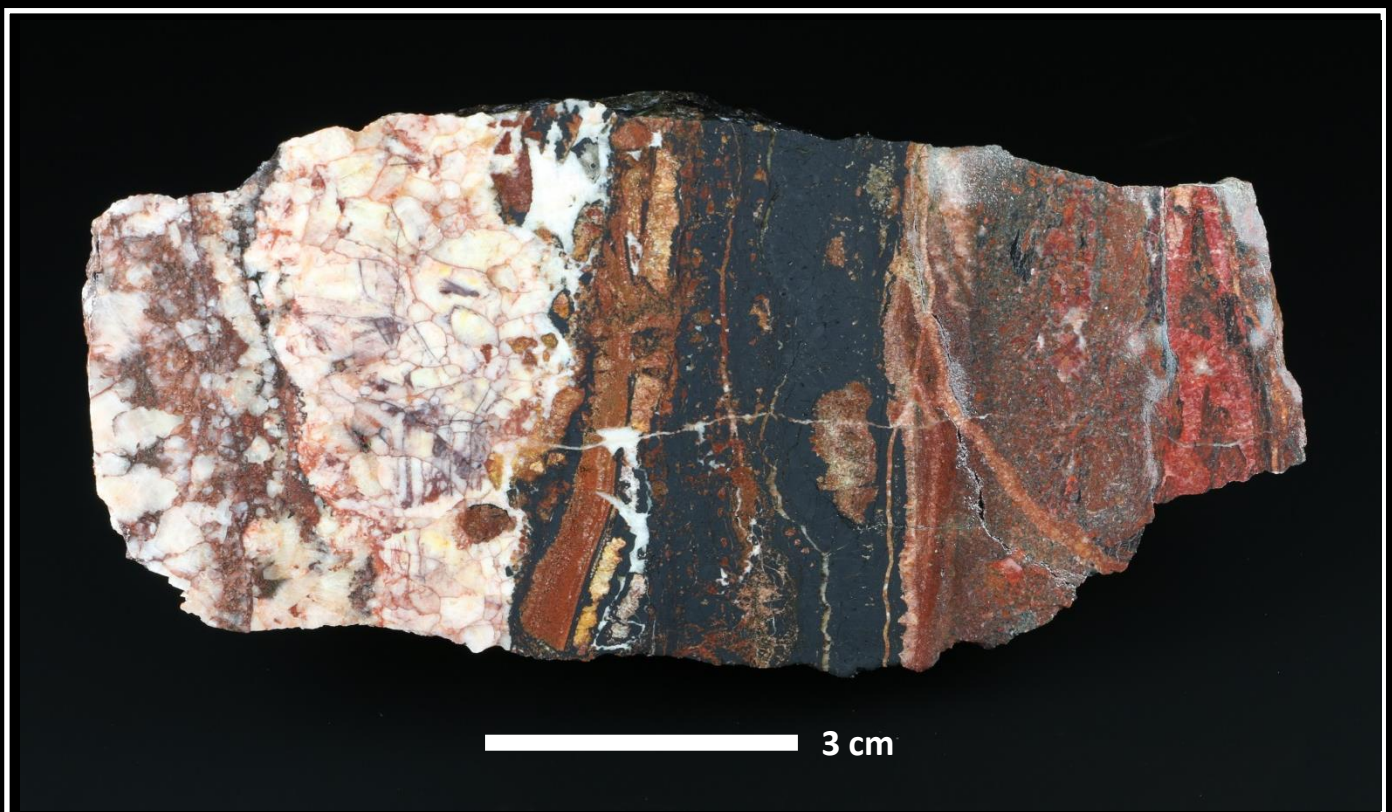


Vzorek nízkoteplotního hydrotermálního uraninitu (UO_2), který pochází z jižní části ložiska Rožná (jáma Bukov I), ze 3. důlního patra, tj. z hloubky asi 120 m pod zemským povrchem. Vzorek byl zapůjčen ze sbírek Moravského zemského muzea. Archivní vzorky uranových rud byly v projektu GeoBarr použity pro analýzy s cílem objasnit datování a fyzikálně-chemické podmínky vzniku studovaných uranových ložisek.

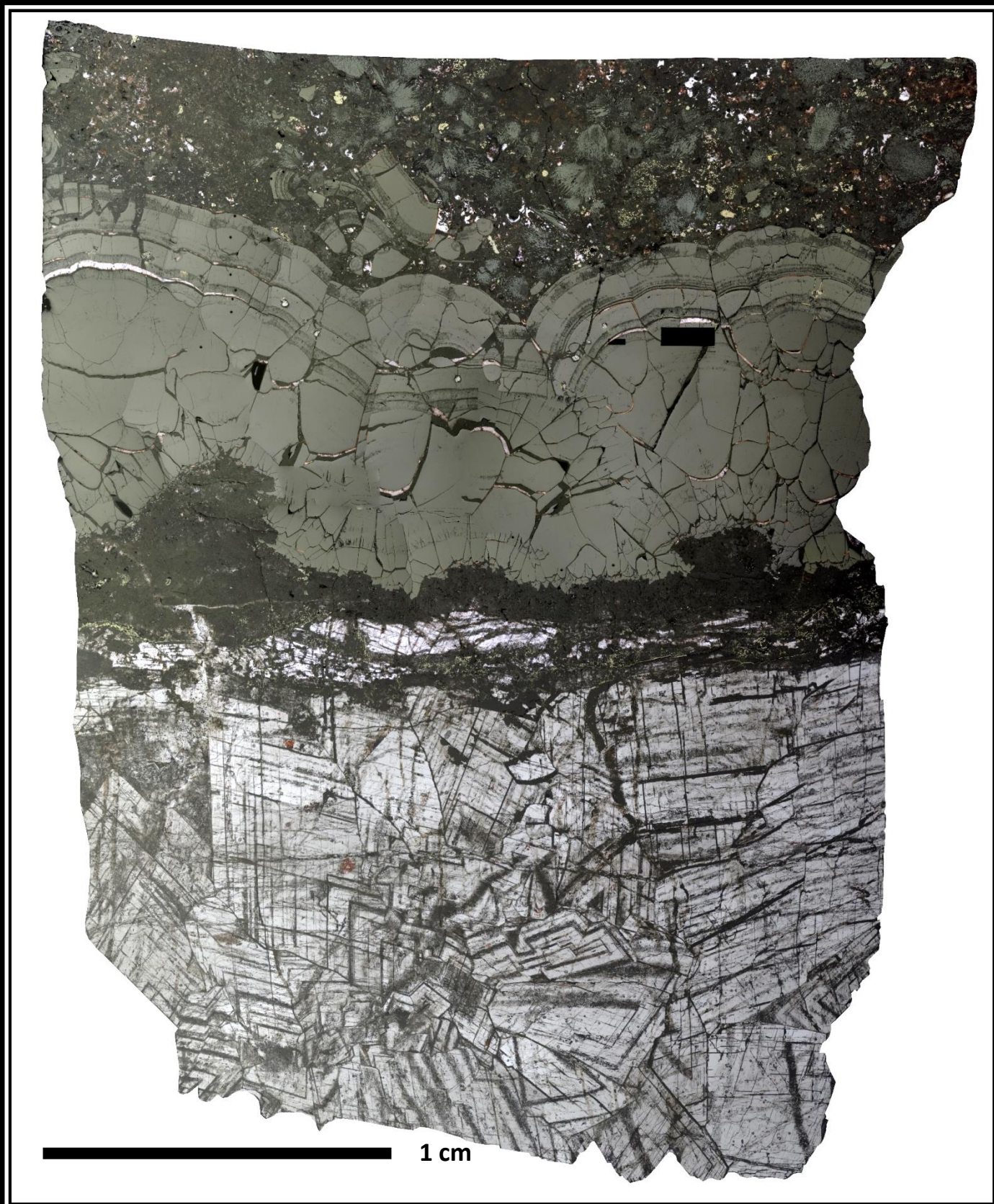
Fotografie: archiv projektu GeoBarr.



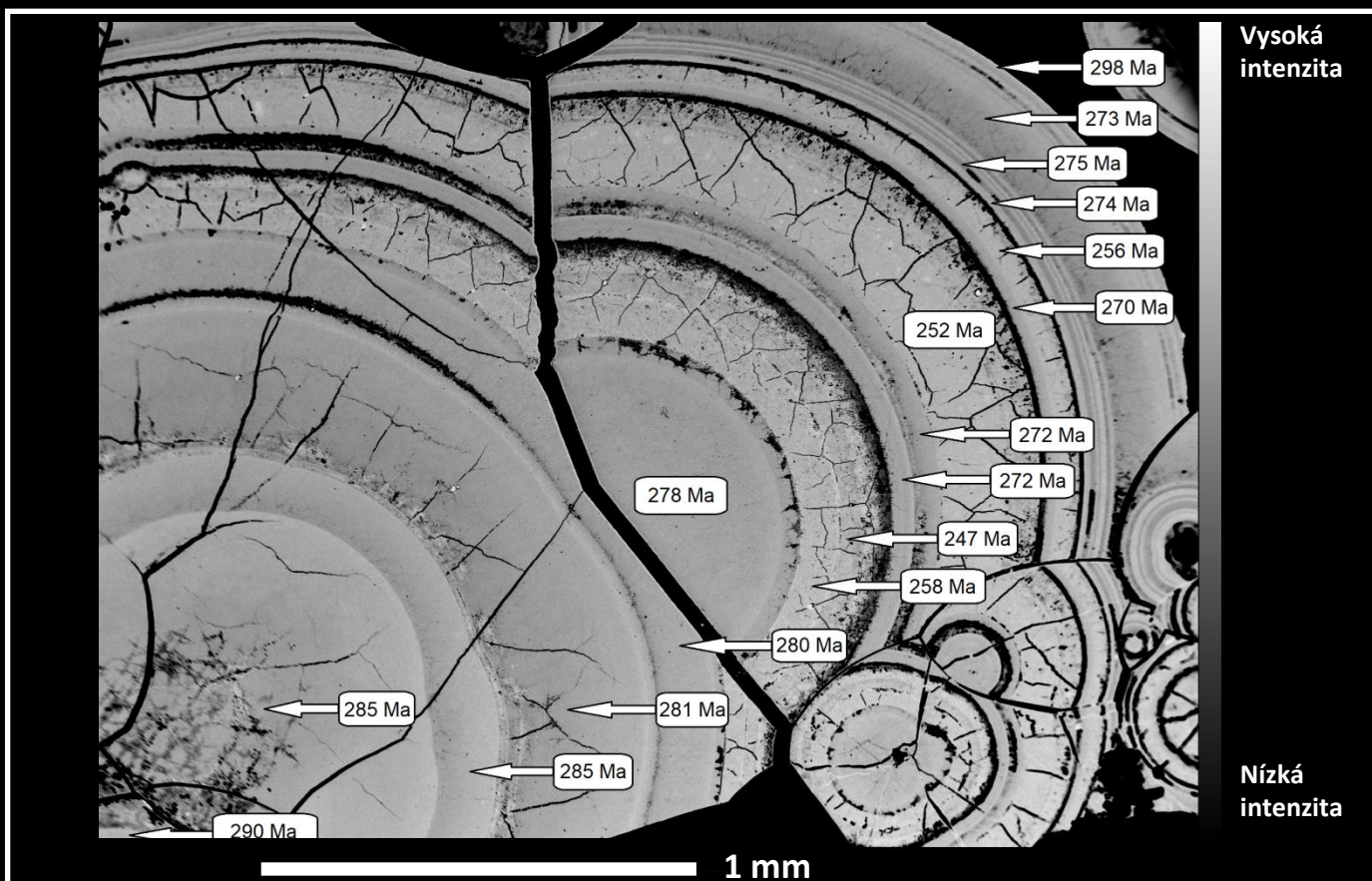
Vzorek typické uranové rudy a doprovodných mineralizací – uraninit (černé a tmavě šedé oblasti) je impregnován světle žlutým chalkopyritem (sulfid mědi), světlé oblasti (bílé a nažloutlé) jsou tvořeny hydrotermálním karbonátem, zejména kalcitem. Vzorek pochází z ložiska Rožná, z jámy R7S.
Fotograf: František Novotný. Fotografie: archiv projektu GeoBarr.



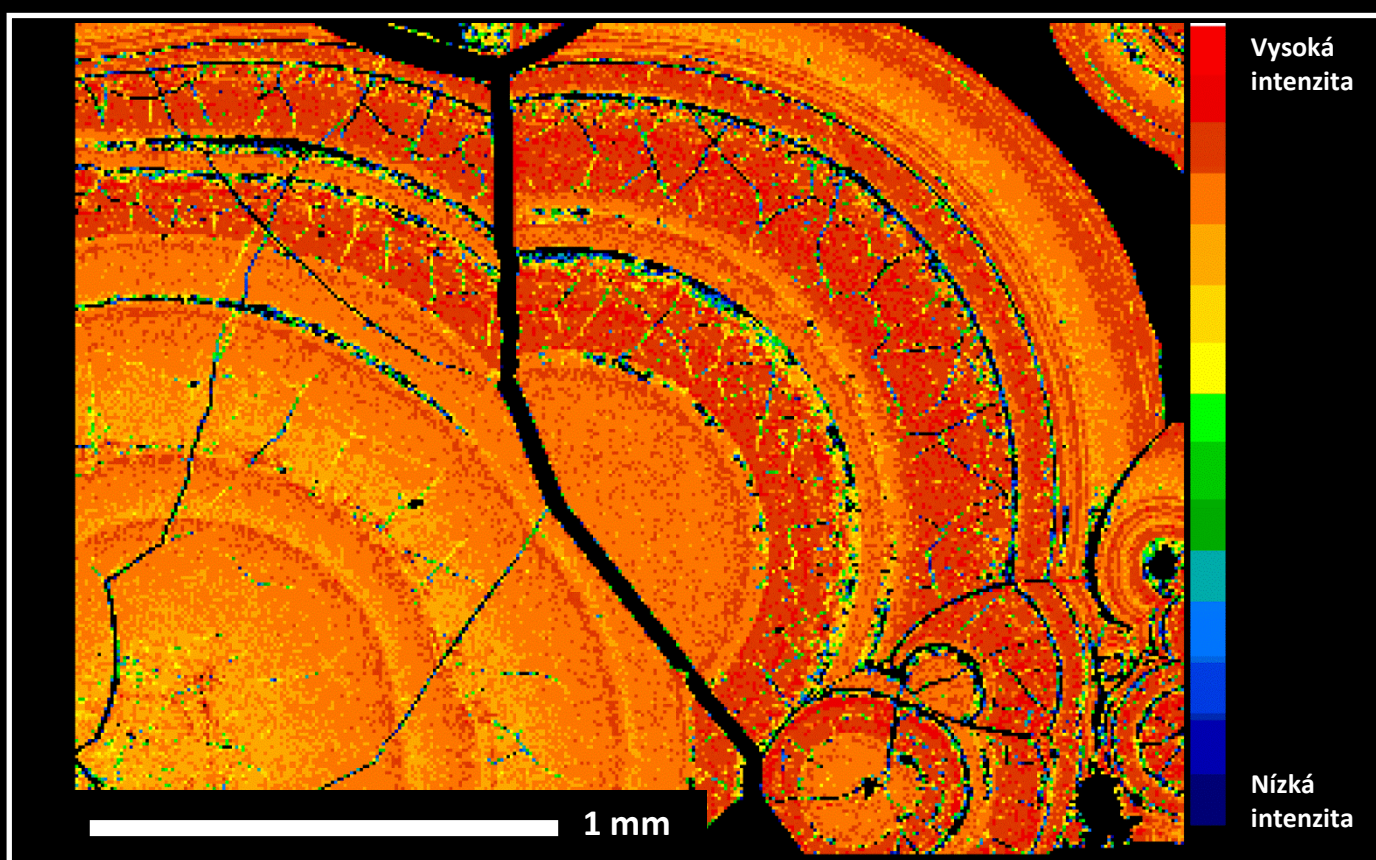
Vzorek typické uranové rudy a doprovodných mineralizací – žíla uraninitu představuje centrální část vzorku (tmavá oblast), levá část je tvořena hydrotermálním karbonátem a pravá část pak okolní horninou postiženou hematitizací (sekundární vznik oxidů železa). Vzorek pochází z ložiska Petrovice u Nového Města na Moravě.
Fotograf: František Novotný. Fotografie: archiv projektu GeoBarr.



Snímek uranové rudy (leštěný výbrus, 100 μm tenká vrstva horniny nalepená na podložní sklíčko) pořízený v mikroskopu v kombinaci procházejícího a odraženého světla. Na výbrusu jsou patrné tři výrazné zóny. Ve spodní části výbrusu se nachází hydrotermální kalcit (CaCO_3) s dobře viditelným systémem štěpnosti podle klence. Prostřední části dominuje žíla masivního uraninitu (světle šedá barva), která ve vrchní části vykazuje zonální stavbu. Malé černé tečky a pravidelný obdélník představují body a mapy vypálené laserovou ablací (viz následující obrázky). Horní část výbrusu je pak tvořena brekciovou (úlomkovou) stavbou sestávající kromě uraninitu také ze sulfidů olova, zinku, mědi a minerálu montroseitu (oxid, hydroxid vanadu a železa), který vytváří paprscité agregáty. Vzorek je z uranového ložiska Slavkovice, fotografie byla pořízena v rámci řešení projektu GeoBarr.

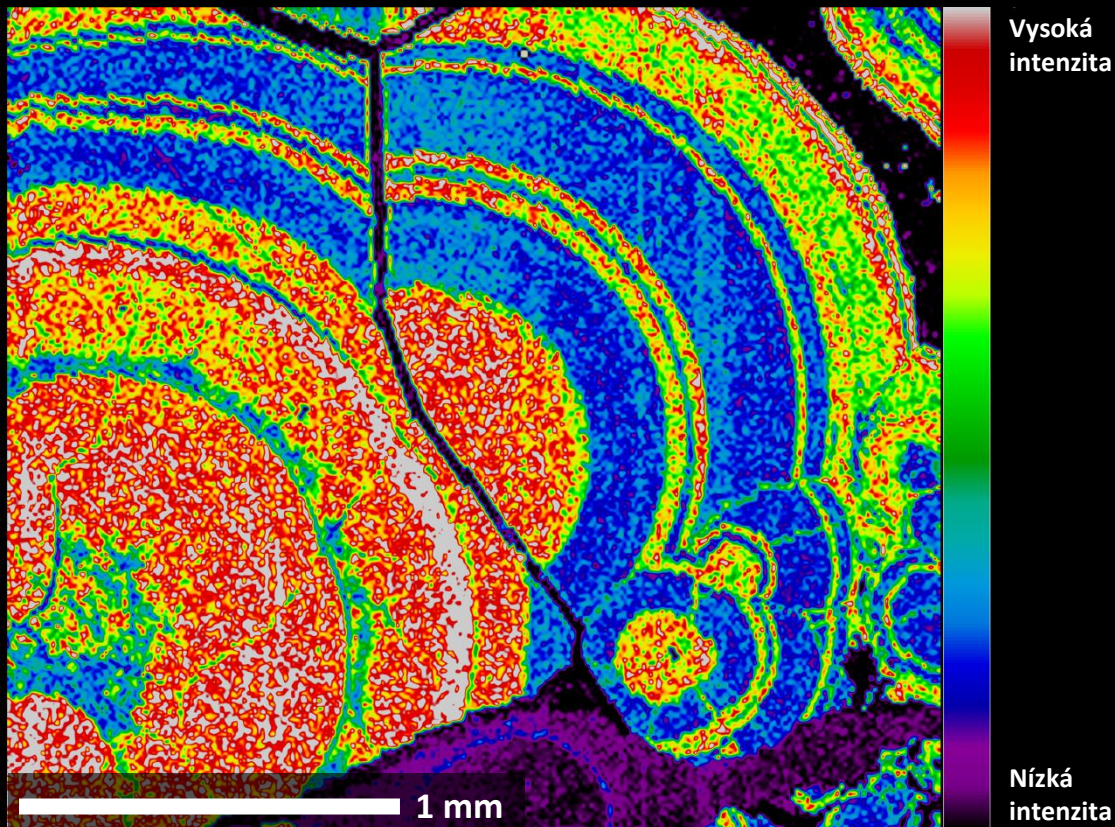


Průřez ledvinitým agregátem uraninitu, zobrazený v módu zpětně odražených elektronů. Vzorek pochází z ložiska Slavkovice u Nového Města na Moravě. Značka **Ma** označuje věk v milionech let. Chemické a následně také izotopické datování potvrdilo dobu vzniku ložisek uranu.



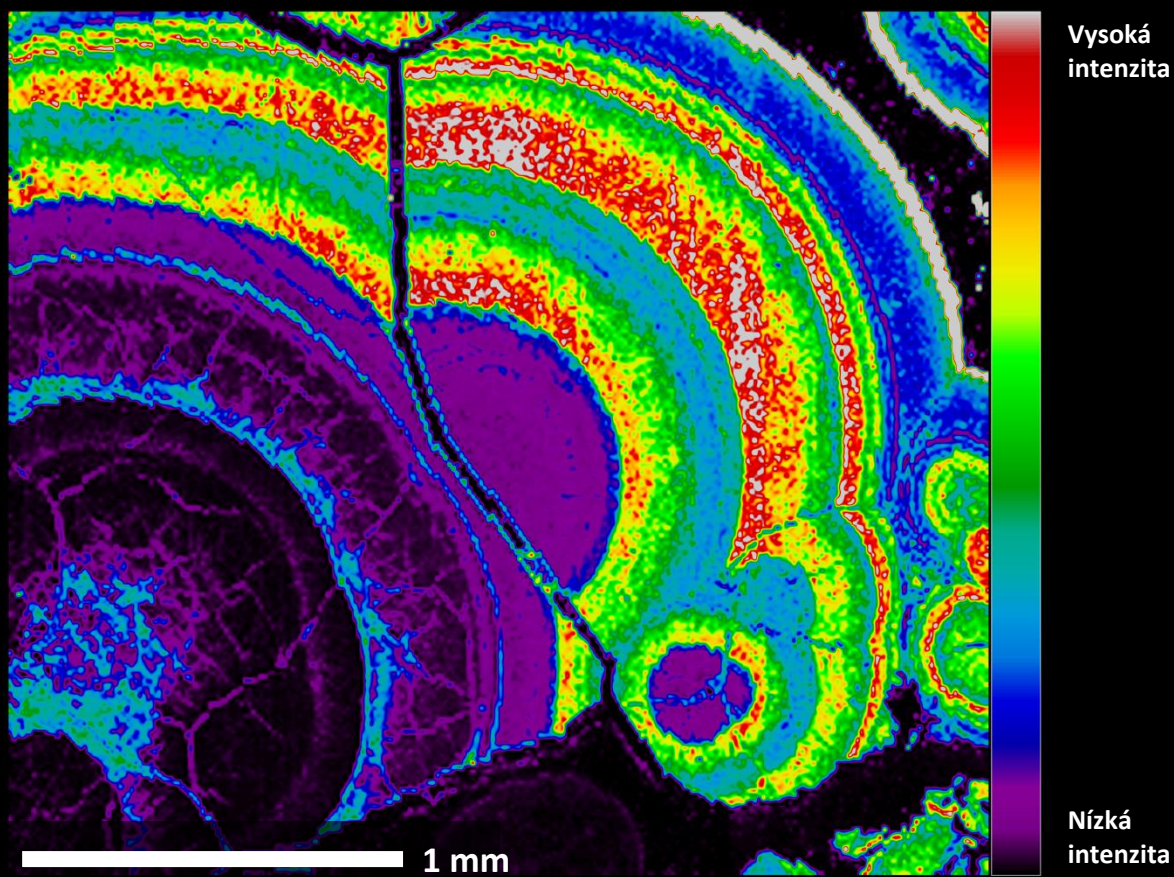
Prvková mapa vytvořená na elektronové mikrosondě pro stejnou oblast jako na horním snímku ukazuje distribuci uranu v jednotlivých zónách ledvinitého agregátu uraninitu. Velikost jednoho pixelu odpovídá velikosti analyzovaného bodu, každý jednotlivý pixel tedy reprezentuje jednu bodovou analýzu. Snímky a analýzy byly provedeny v rámci projektu GeoBarr.

^{95}Mo

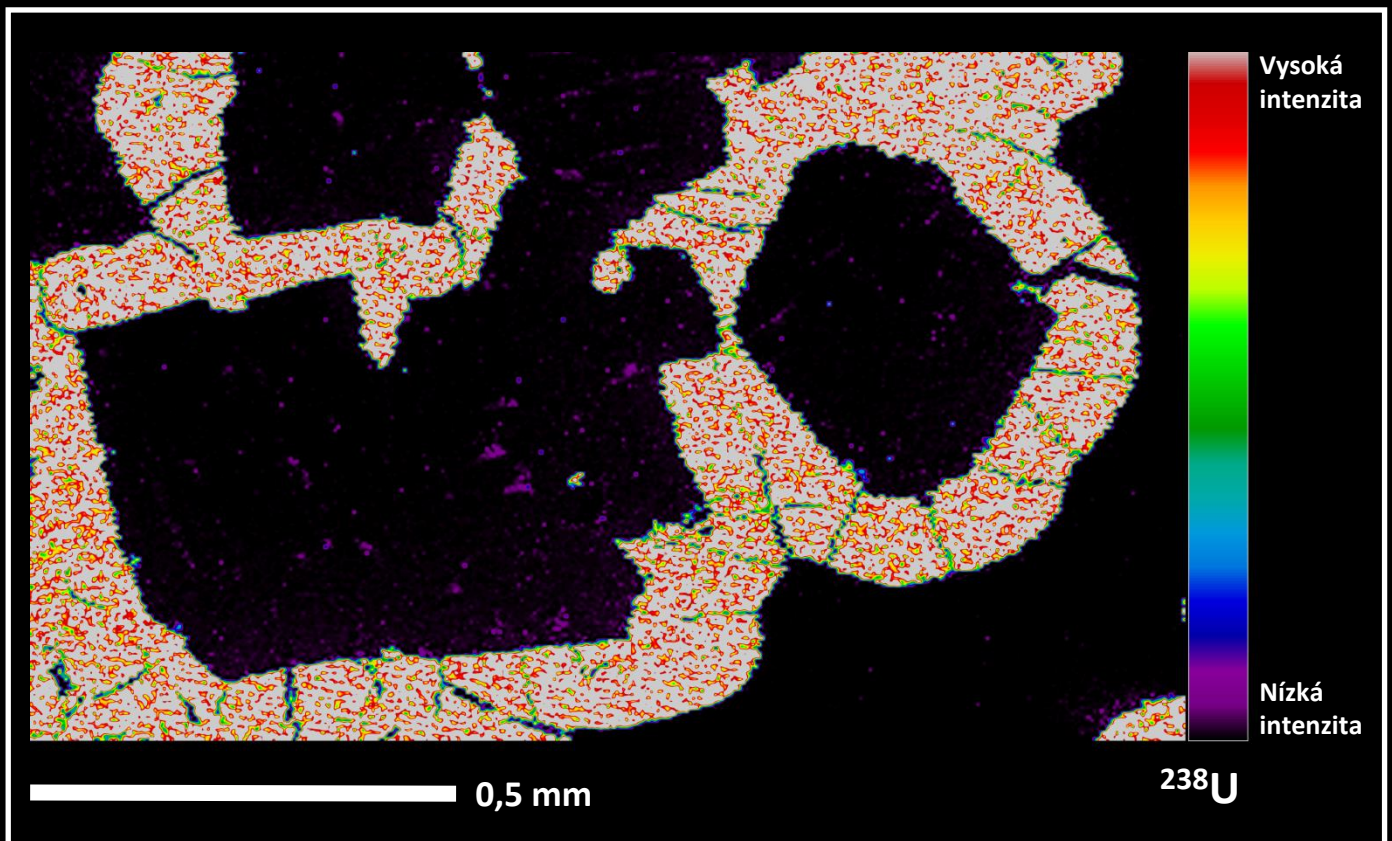


Snímek zobrazuje stejný průřez ledvinitým agregátem uraninitu jako na předchozí straně, vidíme zde distribuční mapu prvku molybdenu. Vzorek pochází z ložiska Slavkovice u Nového Města na Moravě.

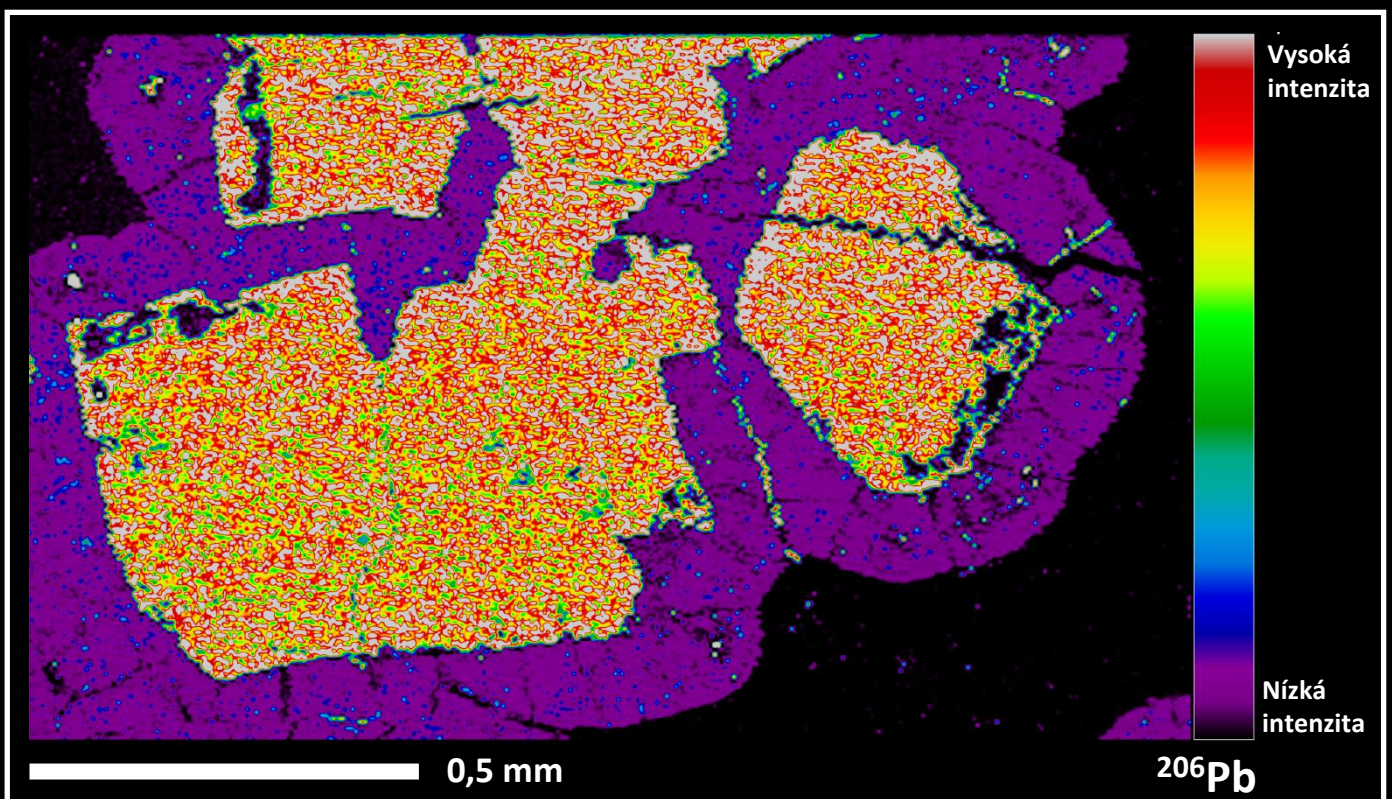
^{121}Sb



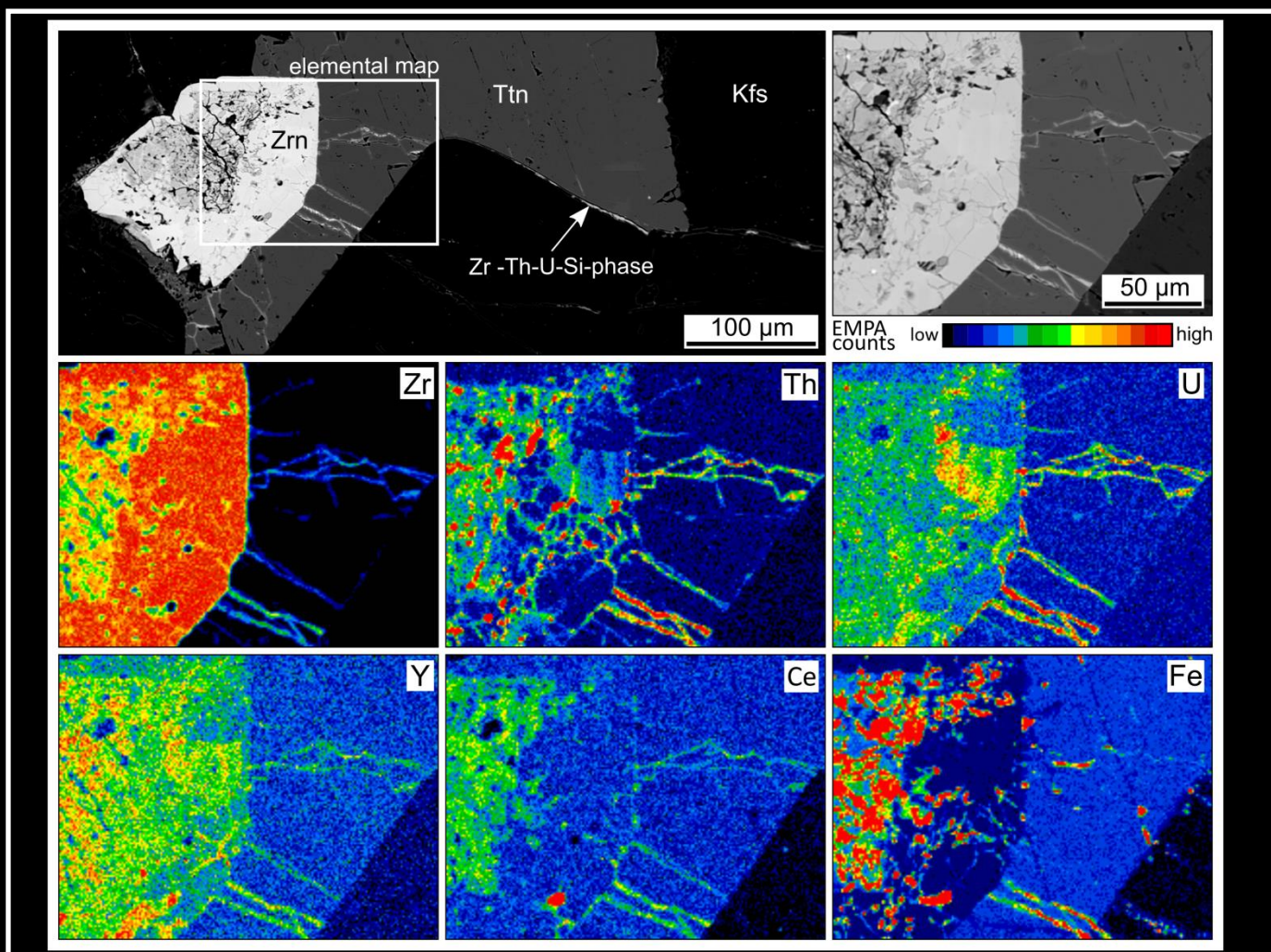
Stejný vzorek, ovšem zde je zobrazena prvková mapa distribuce antimonu v jednotlivých zónách ledvinitého agregátu uraninitu. Za povšimnutí stojí fakt, že oblasti, v nichž se koncentruje antimon, jsou naopak chudé na obsah molybdenu. Prvkové mapy byly tvořeny pro téměř 20 různých izotopů a pomohly pochopit mechanismus vzniku uraninitu.



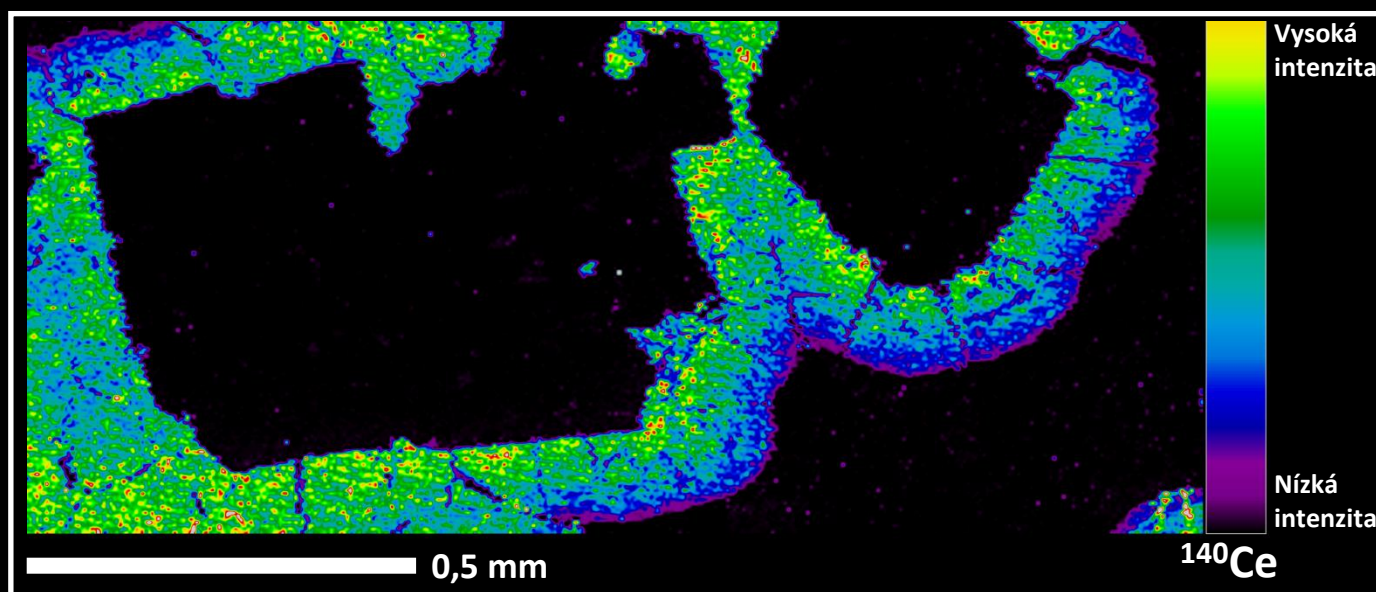
Distribuce izotopu uranu 238 (^{238}U) v rudním vzorku z uranového ložiska Brzkov (4 km severně od města Polná). Uraninit vytváří lemy kolem poměrně dobře omezených zrn galenitu (sulfid olova, PbS). Jak galenit, tak okolí lemů uraninitu tvořené hydrotermálním kalcitem neobsahují žádný uran. Po vzniku před více než 250 mil. lety tak byl uran vázán na tyto sulfidy a nemigroval dále do horninového prostředí.



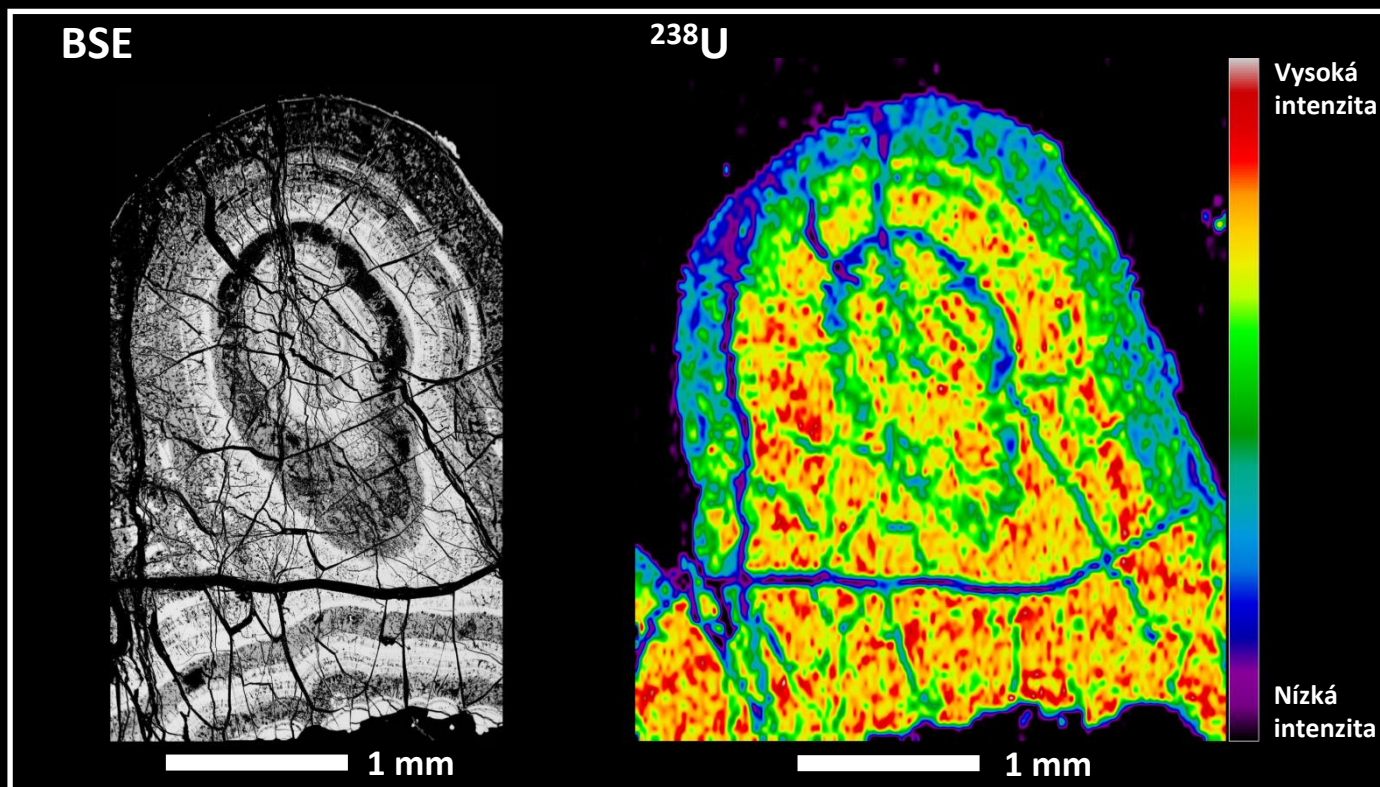
Na tomto snímku je distribuce izotopu olova 206 ve stejném rudním vzorku. Centrální část vzorku s nejsilnějšími intenzitami olova je tvořena galenitem (sulfid olova, PbS), který je lemován uraninitem. Fialová barva značí přítomnost olova v uraninitu, které vzniklo přirozeným radioaktivním rozpadem izotopu uranu 238 na konečný dceřiný produkt – izotop olova 206. Poměrů mezi primárními a dceřinými produkty radioaktivních rozpadových řad se využívá v tzv. radiometrickém datování.



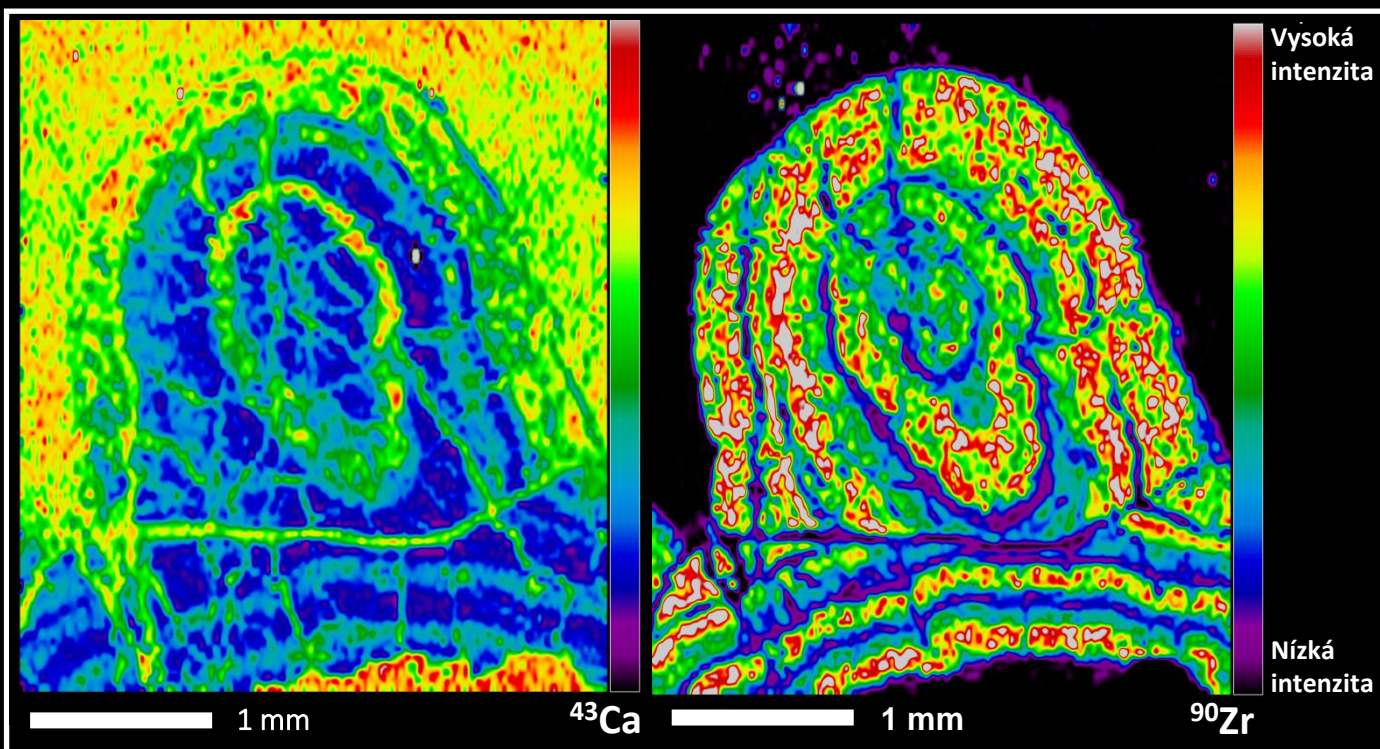
Tyto prvkové mapy ukazují migraci uranu a dalších doprovodných prvků (Th, Zr, Y či prvků vzácných zemin) ze zirkonu, jehož struktura byla poškozena iradiací částicemi alfa (metamiktizací). Při tomto procesu došlo ke zvětšení objemu minerálu a tím k vytvoření sítě drobných trhlin, podél nichž mohl uran migrovat. Tento proces byl popsán u tzv. durbachitů třebíčského masivu. Z těchto hornin uniklo do širokého okolí velké množství uranu, které se následně vysráželo na přírodních bariérách, čímž vznikla ložiska uranu.



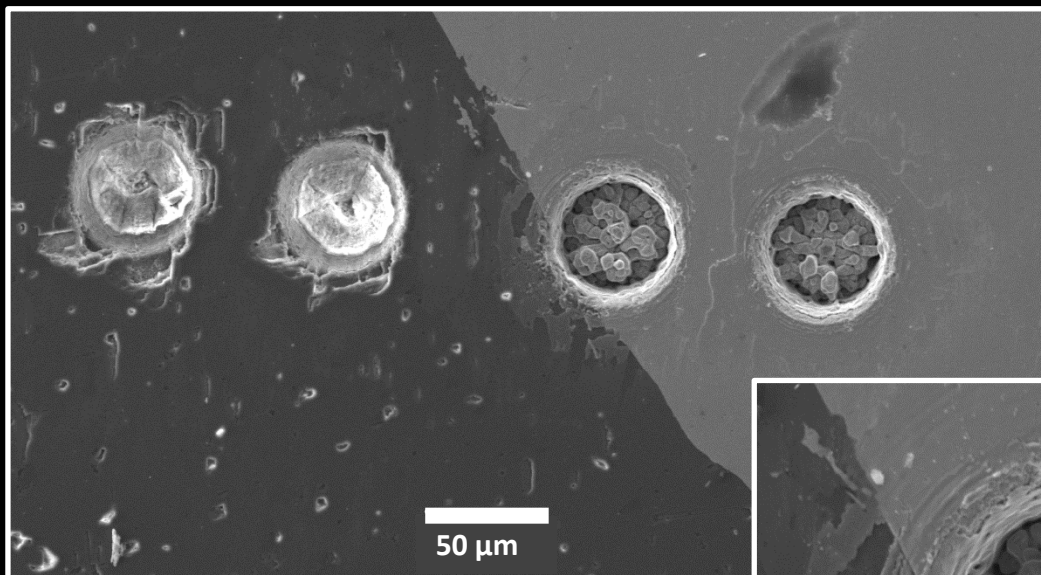
Na této mapě je zobrazena distribuce ceru, jednoho z tzv. prvků vzácných zemin (REE), v rudním vzorku z uranového ložiska Brzkov, situovaného nedaleko durbachitů třebíčského masivu. Jde zde vidět, že uran, který tvoří lemy kolem centrálních sulfidů olova, obsahuje také prvky vzácných zemin, jež migrovaly společně s uranem. Analyzované vzorky uraninitu z Brzkova obsahovaly až 1 hm. % prvků vzácných zemin.



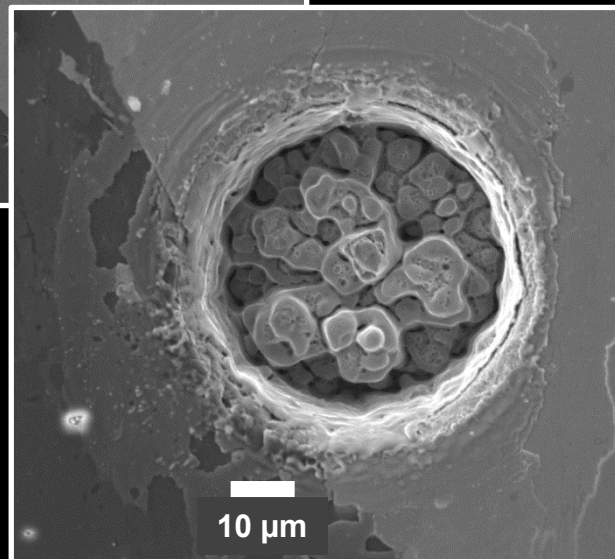
Vlevo snímek průřezu ledvinitým agregátem uraninitu (UO_2), pořizený v módu zpětně odražených elektronů (BSE), kdy se oblasti s nejvyšším zastoupením těžkých izotopů (v našem případě právě uranu) zobrazují nejsvětlejší barvou. Snímek ukazuje jednotlivé zóny a od okrajů intenzivní rozklad (alteraci) uraninitu. Nepravidelné pukliny vyobrazené černě představují mladší žilky jiných minerálů pronikajících uraninitem. Snímek vpravo zobrazuje distribuci izotopu ^{238}U . Zde lze vidět nižší obsahy uranu v zónách postižených alterací. To naznačuje, že při alteraci byly tyto zóny ochuzeny o uran a ten mohl unikat do okolního horninového prostředí.



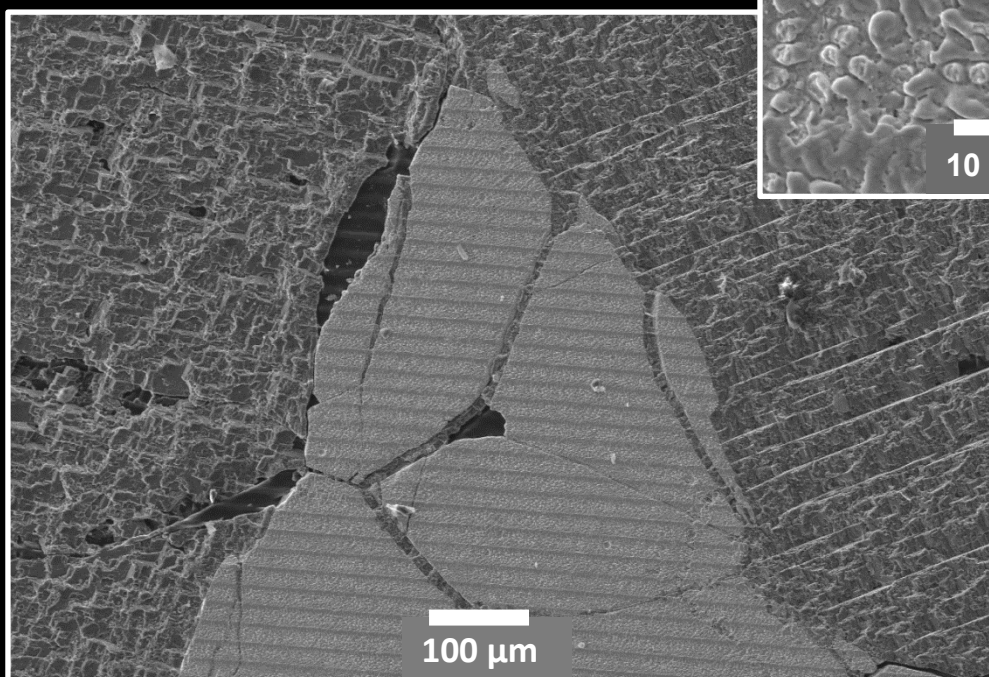
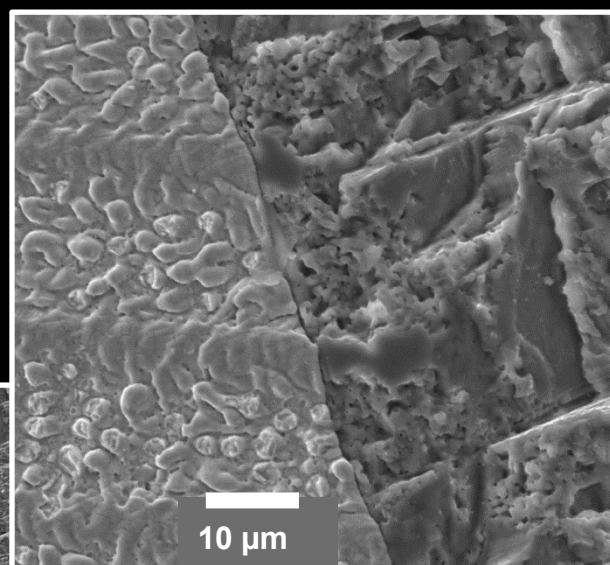
Další dva snímky stejného vzorku uraninitu jako na snímcích výše. Zde je zobrazena distribuce vápníku (^{43}Ca) a zirkonia (^{90}Zr). Distribuční mapa vápníku dokládá negativní korelaci s mapou zastoupení uranu a ukazuje, že okolí i mladší žilky pronikající uraninitem jsou tvořeny hydrotermálním karbonátem (kalcit, CaCO_3). Vápník se také více koncentruje v oblastech, kde je uraninit zcela alterován. Opačně je tomu u zirkonia, které se spíše vyskytuje spolu s uranem (viz popis metamiktizace zirkonu na předchozí straně).



Pro získání přesných chemických analýz bylo v projektu GeoBarr potřeba využít analýzu pomocí hmotnostní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem ve spojení s laserovou ablací (LA-ICP-MS). Vrchní snímek ukazuje krátery vzniklé při tzv. bodových analýzách uraninitu (body vpravo) a karbonátu (body vlevo). Pravý snímek prezentuje detail kráteru v uraninitu, který zachycuje „lalokovité“ agregáty vzniklé částečným natavením uraninitu, neboť uran patří mezi kovové prvky.



Pro prvkové mapy z předešlých stran je nutné provádět LA-ICP-MS analýzy v přesně definovaných liniích. Na snímku dole je zobrazen vzorek po liniové laserové ablací (uraninit a karbonát), znázorňující rozdílné chování těchto minerálů při ablací v důsledku jejich odlišných strukturně-chemických vlastností. Detail vpravo ukazuje opět natavení uraninitu, zatímco z karbonátu se spíše vylamují zrna či jejich části. Fotografie byly pořízeny na elektronové mikrosondě v módu sekundárních elektronů.





Finálním produktem chemické úpravy v Dolní Rožince, která zpracovávala vytěženou uranovou rudu, byl diuranát amonný nazývaný také „žlutý koláč“ (prášek na snímku vpravo dole). Hlavní snímek zachycuje kontejnery s diuranátem amonným, připravené na transport do obohacovacích závodů na výrobu jaderného paliva.

Fotografie: archiv DIAMO o. z. GEAM Dolní Rožinka. Detail „žlutého koláče“: „Yellow Cake“ podle NRCgov is licensed under CC BY 2.0.



Pelety jaderného paliva – nejčastěji se využívá palivo na bázi UO_2 s obohaceným o izotop ^{235}U do 5 %. Vstupním produktem pro proces výroby pelet jaderného paliva je právě „žlutý koláč“.

Fotografie: „Nuclear fuel pellets“ podle NRCgov is licensed under CC BY 2.0.



Jaderná elektrárna Dukovany dlouhodobě pokrývá zhruba 20 % celkové spotřeby elektřiny v ČR. Čtyři bloky JE Dukovany spotřebují za rok zhruba 60 tun obohacených peletek UO_2 . Vyhořelé jaderné palivo je nyní uskladněno v meziskladech na území elektrárny do doby, než bude vyřešena otázka finálního úložiště.

Fotografie: Vlastimil Ott, „Dukovany“ by plastique is licensed under CC BY-SA 2.0.



Plánovanou variantou finálního uložení vyhořelého jaderného paliva je vytvoření podzemního úložiště ve stabilních nepropustných horninových masivech. Od roku 2017 je v provozu Podzemní výzkumné pracoviště Bukov (navazující na infrastrukturu 12. patra bývalého uranového dolu Rožná), kde se testují technická řešení potřebná pro uložení vyhořelého jaderného paliva. S nadsázkou tedy lze říci, že práce na finálním uložení paliva vyrobeného z UO_2 se vrací na místo těžby uranové rudy. Zde se také mohou testovat aspekty a poznatky získané v rámci projektu GeoBarr.

Fotograf: Martin Přibíl. Fotografie: archiv DIAMO o. z. GEAM Dolní Rožínka.

CESTY URANU ANEB KDYŽ GEOLOG POTKÁ CHEMIKA V „GEOBARRU“

Vojtěch Wertich, Markéta Holá, Martin Kubeš, Jaromír Leichmann, Petr Navrátil, Kateřina Zachovalová

Obálka: Prvková mapa zobrazující distribuci antimonu v jednotlivých zónách ledvinitého agregátu uraninitu.

Fotografie: archiv projektu GeoBarr.

Fotografie byly pořízeny v rámci řešení projektu

Dlouhodobý výzkum geochemických bariér pro ukládání radioaktivního odpadu,
reg. č. CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_026/0008459.

Grafická úprava a sazba: Mgr. Kateřina Zachovalová, PhD.

Jazyková revize: Mgr. Svatava Vráželová

Vydavatel: Masarykova univerzita, Žerotínovo nám. 617/9, 601 77 Brno

Tisk: Expresta, Devínska Nová Ves 7465, 841 07 Bratislava

1. vydání

ISBN 978-80-280-0319-7

ISBN 978-80-280-0320-3 (on-line ; pdf)

www.ugv.cz

MUNI
SCI

MUNI
PRESS