

# Nové U-Pb datování zirkonů z bohutínského pně v příbramské rudní oblasti

New zircon U-Pb dating of the Bohutín Stock in the Příbram Ore Region, Czech Republic

KAREL ŽÁK<sup>1</sup> – MARTIN SVOJTKA<sup>1</sup> – KAREL BREITER<sup>1</sup> –  
JANA ĎURIŠOVÁ<sup>1</sup> – FRANTIŠEK VESELOVSKÝ<sup>2</sup> – JAN PAŠAVA<sup>2</sup>

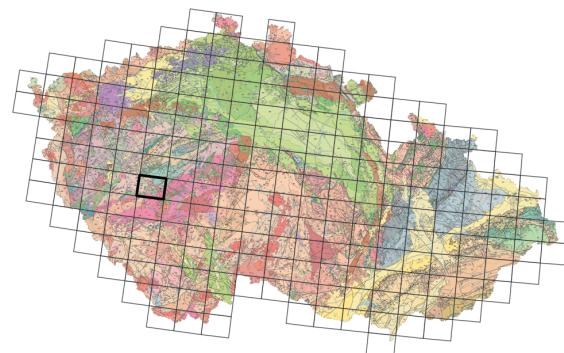
<sup>1</sup> Geologický ústav AV ČR, v. v. i., Rozvojová 269, 165 00 Praha 6;  
zak@gli.cas.cz

<sup>2</sup> Česká geologická služba, Klárov 3, 118 21 Praha 1

**Key words:** Bohemian Massif, Central Bohemian Plutonic Complex, Bohutín Stock, zircon U-Pb dating

**Summary:** The Bohutín Stock is one of several small isolated intrusions occurring in the northern surroundings of the Variscan Central Bohemian Plutonic Complex (Bohemian Massif, Czech Republic). The stock with surface outcrop area of about 3.6 sq. km is known thanks to intensive underground mining of the Bohutín Ag-Pb Zn-Sb vein-type deposit (1841–1979) down to 1350 m below the surface. The Bohutín Stock is a petrographically variable body with quartz diorite or tonalite as the most widespread rock type. More basic diorite to gabbrodiorite enclaves as well as rocks of granodiorite to granite composition (trondhjemite) also occur in the stock.

Earlier conventional K-Ar ages of the Bohutín Stock indicated Silurian to Early Devonian age of the intrusion (440–400 Ma) which was rather controversial, since the formation of majority of the Central Bohemian Plutonic Complex covers a period between  $354 \pm 4$  and  $337 \pm 1$  Ma. One later Ar-Ar age determination on amphibole from a gabbrodiorite enclave had excess argon with plateau age of  $348.5 \pm 0.5$  Ma. To solve this controversy, the main intrusive rock type of Bohutín Stock, quartz diorite, was dated by zircon U-Pb method using laser ablation ICP-MS. The dated sample was collected at a depth of 1199 m below the sur-



(22-12 Březnice)

face. Representative cathodoluminescence images of the dated zircon grains are shown in Fig. 1 and U-Pb concordia diagram for zircons from Bohutín in Fig. 2.

Studied quartz diorite from the deeper part of the Bohutín Stock is homogeneous equigranular fine-grained rock composed of (in descending order) subhedral zoned plagioclase (labradorite–oligoclase), actinolitic amphibole, anhedral biotite, quartz, and K-feldspar. For chemical composition of studied sample see Table 1.

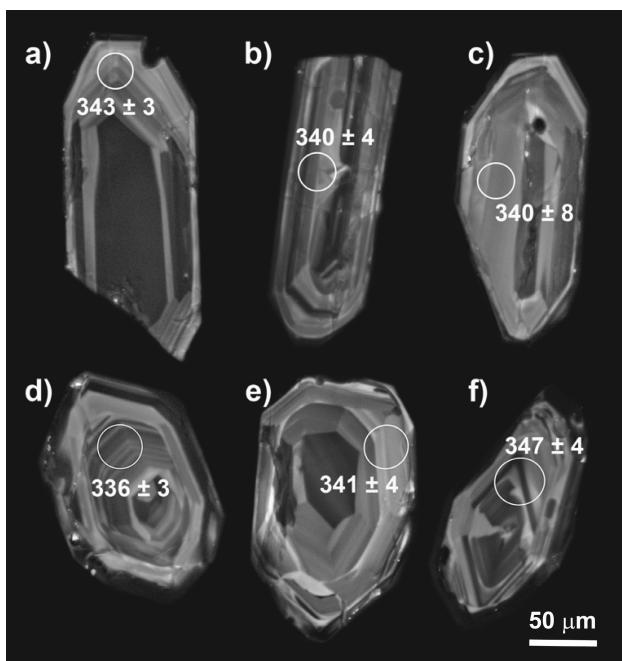
The obtained U-Pb zircon concordant age of  $344.2 \pm 0.6$  Ma (for data of individual zircon grains see Table 2) is close to the age of zircons from granodiorite of the nearby Padří Stock ( $342.8 \pm 1.1$  Ma). Both small intrusions therefore probably intruded in the same phase of structural evolution of the complex boundary zone between Moldanubian Unit and Bohemicum. Their age is within the age range of the main intrusive masses of the Central Bohemian Plutonic Complex.

Bohutínský peň (Stočes 1917, Urban 1937, Dudek – Fediuk 1956a, Vlašimský 1982, Bambas 1990, Klomínský 2010) je jedním z relativně malých satelitních těles středočeského plutonu (či nověji středočeského plutonického komplexu), která intrudovala severně od hlavních hmot tohoto rozsáhlého plutonického komplexu do hornin barrandienského neoproterozoika a kambria. Nachází se v oblasti s mimořádně dlouhou tradicí jak průzkumu a těžby žilných rudních mineralizací, tak i geologických výzkumů, která je tradičně označována jako příbramská rudní oblast.

Výchozová partie bohutínského pně (~3,6 km<sup>2</sup> v úrovni současného povrchu; Klomínský 2010) leží v poměrně plochém, mírně k JV skloněném terénu na úpatí středních Brd, těsně s. a sz. od obce Bohutín. Vzhledem k hlubokému zvětrání těleso nevytváří výchozy, historicky v něm byla otevřena jen jedna pískovna v jeho sz. okraji, a to jen v eluviu se zachovalými jádry nezvětralé horniny. Těleso je však známo díky rozsáhlým důlním pracím na žilném hy-

rotermálním ložisku Ag-Pb-Zn-Sb rud Bohutín, ze kterého byl křemenný diorit poprvé popsán již v roce 1855. Těžební práce zde během hlavní fáze těžby (v letech 1841–1979) postupně zasáhly až do hloubky 1350 m pod povrch. Do vlastního intruzivního pně však těžba pronikala jen v menší míře. Většina ekonomicky využitelných rudních žil, i když jsou relativně mladší než intruze bohutínského pně, vystupuje jižně od něj, v horninách kambria, kde mnohdy sledují předvariské diabasové žíly.

Další informace o plošném rozsahu bohutínského pně v úrovni současného povrchu a o jeho petrografické variabilitě přinesly v 70. letech 20. století mělké vrty (Klomínský 2010). V té době se uvažovalo o využití připovrchové, písčité rozpadavé partie tělesa pro stavění výrobny; k těžbě však nedošlo. Po ukončení těžby rud proběhl v tělese a jeho těsném okolí v letech 1979–1982 průzkum a experimenty zaměřené na vybudování podzemního kavernového zásobníku plynu, k jehož vybudování ale rovněž nedošlo.



Obr. 1. Vybrané zirkony z datovaného vzorku zobrazené pomocí katodové luminiscence. Oblasti s průměrem  $30 \mu\text{m}$  po laserové ablaci jsou označeny společně se získaným stářím  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  / Fig. 1. Representative cathodoluminescence images of the dated zircon grains. The  $30 \mu\text{m}$  spots where laser-ablation analysis was performed are indicated together with obtained  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  ages.

Tabulka 1. Chemická analýza studovaného vzorku (hlavní prvky %, stopové prvky ppm) / Table 1. Chemical analyses of studied sample (major elements wt.%, trace elements ppm)

$\text{SiO}_2$	60,89	Cr	182
$\text{TiO}_2$	0,74	Ni	39
$\text{Al}_2\text{O}_3$	15,97	Cu	20
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	1,42	Zn	71
$\text{FeO}$	4,47	As	< 1
$\text{MgO}$	3,96	Rb	70
$\text{MnO}$	0,14	Sr	192
$\text{CaO}$	5,66	Y	21
$\text{Na}_2\text{O}$	2,90	Zr	116
$\text{K}_2\text{O}$	1,89	Nb	8
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,14	Mo	< 1
F	0,05	Sn	2
$\text{CO}_2$	0,07	Pb	16
$\text{C}_{(\text{ost.})}$	0,03	Bi	2
$\text{S}_{(\text{tot.})}$	< 0,01	Th	10
$\text{H}_2\text{O}^{(+)}$	1,36	U	< 2
$\text{H}_2\text{O}^{(-)}$	0,11		
$\text{F}_{(\text{ekv})}$	-0,02		
$\text{S}_{(\text{ekv})}$	-0,00		
Total	99,83		

Z publikovaných prací (např. Stočes 1917, Urban 1937, Dudek – Fediuk 1956a, Vlašimský 1982, Bambas 1990, Klomínský 2010) je zřejmé, že názory na morfologii tělesa a prostorové vztahy jednotlivých typů intruzivních hornin v jeho rámci prodělaly během času značný vývoj. Nejpodrobněji a v mnohem odchylně od dřívějších prací zobrazuje povrchový půdorys a řez tělesem Klomínský (2010). Těleso je petrograficky a chemicky poměrně variabilní. Převažující horninový typ byl označován jako křemenný diorit nebo tonalit, v menších tmavých enklávách se ale vyskytuje i horniny bazičtější, odpovídající dioritu až gabrodioritu. Hlavně v sz. sektoru tělesa byly zjištěny také horniny kyselejší, složením odpovídající granodioritu až granitu. Ty Klomínský (2010) označil jako trondhjemity. Obvykle byly jednotlivými autory publikovány průměrné hodnoty chemismu hornin z několika vzorků pro každý petrografický typ, nešlo tedy o analýzy jednotlivých vzorků, vázané na jejich petrografický popis včetně chemismu hlavních horninotvorných minerálů. Cílem této stručné zprávy není diskutovat geologické a strukturní charakteristiky nebo petrografickou variabilitu bohotínského pně či jeho geochemii v celé šíři dostupných poznatků. Zaměřujeme se pouze na problematiku geochronologickou. Petrografická a geochemická charakteristika bude proto v dalším textu podrobněji rozvedena pouze pro datovaný vzorek.

Zvýšený zájem o stáří bohotínského pně vzbudila data metody K-Ar, získaná v 70. a 80. letech V. Šmejkalem, která naznačovala vznik tělesa již v siluru či spodním devonu. Tři údaje v rozmezí 440–400 Ma, získané na amfibolu a biotitu, zmiňuje například Vlašimský (1982). I když tato

data nebyla nikdy plnohodnotně publikována (tedy včetně popisu metodiky, chyb stanovení apod.), řada dalších autorů informaci o výrazně vyšším stáří bohotínského pně oproti hlavním horninovým typům středočeského plutonu převzala a zahrnula do svých představ o geologickém vývoji příbramské rudní oblasti (např. Bambas 1990). Podle doby, ve které byla tato nepublikovaná K-Ar data pořízena, lze usoudit, že byla získána po extrakci argonu jednorázovým tavením separovaných vzorků amfibolu a biotitu, s metodou izotopového ředění pro stanovení množství získaného argonu.

Žák et al. (1998) datovali čistě separovaný amfibol z tmavší gabrodioritové enklávy uvnitř bohotínského pně pokročilejší metodou Ar-Ar s převedením draslíku ve vzorku neutronovou iradiací na izotop  $^{39}\text{Ar}$  (i obsah draslíku se potom stanovuje podle zastoupení tohoto izotopu argonu) a se stupňovitým uvolňováním argonu ze vzorku. Nižší teplotní kroky uvolňování argonu naznačovaly stáří až k 370 Ma, zatímco stáří plata (teplota uvolňování 1150–1600 °C) bylo  $348,5 \pm 0,5$  Ma (Žák et al. 1998). I toto plato ale bylo zřejmě do určité míry ovlivněno nadbytečným argonem, který do sebe rozměrově nevelké těleso bohotínského pně mohlo pohltit při intruzi do mnohem starších, téměř nemetamorfovaných hornin neoproterozoka. Tyto údaje naznačují, že argonové metody nejsou pro bohotínské těleso, pronikající do mnohem starších hornin a postižené často hydrotermálními alteracemi, tou nejvhodnější volbou. Dříve získaná silurská stáří však byla vyloučena uvedeným Ar-Ar datováním. K úplnému vyjasnění a zpřesnění stáří hlavní intruzivní fáze bohotínského

pně bylo proto použito datování zirkonů metodou U-Pb (pomocí laserové ablaci ICP-MS). Využit byl objemný archivní vzorek Bohutín-11 (zkráceně BK-11), odebraný J. Klomínským a V. Bláhou na 33. patře dolu, 100 m od nárožíště 33. patra, tedy v hloubce zhruba 1199 m od ohlubně šachty. Název šachty v době odběru vzorku byl *Důl 25. únor* (dříve se nazývala *Důl korunního prince Rudolfa*, též *Důl Rudolf či lidově Rudolfa*, jáma zaražena 1878; potom za první republiky *Důl generála Rostislava Štefánika*, zkráceně *Štefánik*). Objemný vzorek (~50 kg) byl v mezidobí dlouhém několik desítek let mezi odběrem a datováním uložen v těsném plastovém barelu ve skladech České geologické služby.

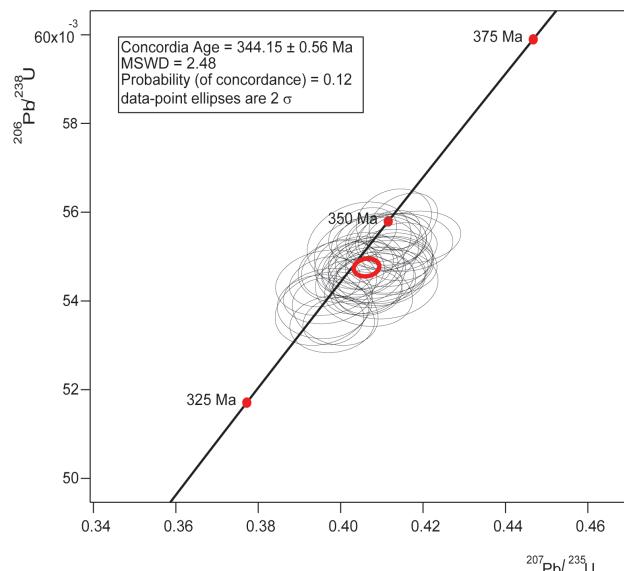
## Metodika

Z přibližně 50kg vzorku, uloženého v kusech o velikosti do  $10 \times 10 \times 10$  cm, bylo náhodně vybráno několik kusů čerstvě vypadající horniny o celkové hmotnosti zhruba 5 kg a ty byly podrceny na čelistovém drtiči. Malá část drceného materiálu byla po kvartaci homogenizována pro chemickou analýzu. Zirkon byl ze zbývajícího velkého objemu rozdceného materiálu separován sekvencí obvyklých fyzikálních postupů, tedy sítováním, získáním těžké frakce na koncentračním stole Wilfley a dalším dělením nemagnetického podílu těžké frakce v těžkých kapalinách (postupně tetrabromethan a dijodomethan). Zirkony byly potom ručně vybrány podle morfologických typů, zality do epoxidového disku a naleštěny. Před vlastní analýzou byla vnitřní stavba vybraných zrn zirkonu charakterizována pomocí katodové luminiscence v laboratořích České geologické služby.

Izotopové poměry Pb a U byly měřeny na hmotnostním spektrometru s indukčně vázanou plazmou (ICP-MS) Element 2 (výrobce Thermo Scientific), vybaveném laserovým ablačním systémem (213-nm NdYAG UP-213, New Wave Research). Frekvence laserového svazku byla 5 Hz, průměr paprsku 30  $\mu\text{m}$ , fluence 4–5  $\text{J.cm}^{-2}$ . Analýzy byly provedeny v Geologickém ústavu AV ČR v Praze. Snímány byly hmoty 204, 206, 207, 208, 232 a 238.

Pro laserování studovaných zirkonů byla aplikována nízkoobjemová cela, umožňující rychlý proplach (minimalizace memory efektů) a účinnou homogenizaci aerosolu. Jako nosný plyn bylo použito helium. Nečistoty (hlavně Hg) v nosném plynu, které mohou způsobit koincidence na hmotě 204 ( $^{204}\text{Hg}$  a  $^{204}\text{Pb}$ ), byly redukovány pomocí pasti s píska pokoveným zlatem. Příspěvek „obyčejného olova 204“ k celkovému olovu byl menší než 0,1 %. Sběr dat pro každý měřený vzorek i standard se skládal z 35 s měření pozadí, následovaného měřením signálů U a Pb po dobu dalších 50 s.

Prvková frakcionace a přístrojová diskriminace hmot byly korigovány normalizací na interní přírodní zirkonový U-Pb standard Plešovice (Sláma et al. 2008) a referenční přírodní zirkonový U-Pb standard GJ-1 (Jackson et al. 2004). Oba standardy poskytly data v rámci analytické chyby shodná s publikovanými údaji. Zpracování naměřených dat a jejich grafických výstupů bylo provedeno programem Iolite, verze 3.0 (Paton et al. 2010, 2011).



Obr. 2. U-Pb konkordie pro zirkony z bohutínského pně (41 analýz). Všechna data jsou znázorněna s chybou  $2\sigma$  / Fig. 2. U-Pb concordia diagram for zircons from the Bohutín Stock (41 analyses). All data are plotted with  $2\sigma$  uncertainties.

Pro chemickou charakteristiku datovaného vzorku horniny byly použity postupy běžné v laboratořích České geologické služby (podrobněji s citacemi k chybám stanovení např. Žák et al. 2014), tedy stanovení  $\text{SiO}_2$  titrační metodou a dalších hlavních oxidů pomocí plamenné AAS (AAnalyst 100), uhlíku a síry pomocí prvkového analyzátoru (ELTRA CS-500) a stopových prvků rentgenfluorescenční metodou (ARL9400 Advant'XP). Chemismus hlavních horninotvorných minerálů datovaného vzorku byl stanoven pomocí elektronové mikrosoudy CAMECA SX100 v laboratořích Geologického ústavu AV ČR s použitím vlnově disperzního modu, urychlovacího napětí 15 kV, proudu 10 nA a průměru paprsku 2  $\mu\text{m}$ . Použity byly obvyklé standardy a doby načítání signálu pro tento typ vzorků (podrobněji byla shodná metodika uvedena v práci Žáka et al. 2014).

## Stručná petrografická a geochemická charakteristika datovaného vzorku

Studovaný vzorek křemenného dioritu je šedočerný a stejnomořně drobně zrnitý. Skládá se z cca 50 % plagioklasu, 20 % biotitu, 15 % amfibolu, 10 % křemene, 3 % draselného živce, z apatitu, zirkonu a dalších akcesorií. Subautomorfní plagioklas je zřetelně zonální se silně rozloženými jádry o složení labradoritu (An 55) a lemy oligoklasu (An 27). Subautomorfní amfibol je nehomogenní a jeho složení kolísá mezi Mg-amfibolem a aktinolitem (#Mg 55–65; (#Mg je definováno jako atomový poměr Mg/(Mg + Fe)). Xenomorfní biotit je homogenní a relativně mladší než amfibol, jeho složení odpovídá přechodu annitu a flogopitu (#Mg 50–51). Xenomorfní křemen a sporadicky přítomný K-živec vyplňují mezery mezi dříve krystalizujícími minerály.

Tabulka 2. U-Pb data zirkonů získaná pomocí laserové ablaci ICP-MS z bohatínského pně v příbramské rudní oblasti (vzorek BK-11) /  
Table 2. Laser ablation ICP-MS U-Pb data for zircons from the Bohutín Stock in the Příbram Ore Region (sample BK-11)

	opravené izotopické poměry					získaná stáří (Ma)					obsah U, Th a Pb (ppm)						
	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{235}\text{U}^*}$	$\pm 2\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}}$	$\pm 2\sigma$	korel. chyby	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{235}\text{U}^*}$	$\pm 2\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}}$	$\pm 2\sigma$	Cca U	$\pm 2\sigma$	Cca Th	$\pm 2\sigma$	Cca Pb	$\pm 2\sigma$	Th/U	
		(abs.)		(abs.)	6/38 vs. 7/35		(Ma)		(Ma)	(ppm)	(abs.)	(ppm)	(abs.)	(ppm)	(abs.)	(abs.)	poměr
Vzorek BK-11																	
BK-11_1	0,4106	0,0094	0,0553	0,0006	0,0186	348	6,7	347	3,7	147	3,7	82	2,6	42	1,4	0,6	
BK-11_2	0,4138	0,0087	0,0550	0,0005	-0,0300	350	5,8	345	3,3	227	2,6	135	1,5	68	1,3	0,6	
BK-11_3	0,4049	0,0079	0,0549	0,0006	0,0769	344	5,7	344	3,6	222	1,9	90	0,6	44	0,9	0,4	
BK-11_4	0,4120	0,0110	0,0548	0,0006	0,0961	347	7,5	344	3,9	116	1,1	50	0,3	24	0,6	0,4	
BK-11_5	0,3990	0,0100	0,0538	0,0008	-0,1894	340	7,5	337	4,6	191	1,7	79	0,6	39	1,2	0,4	
BK-11_6	0,4100	0,0110	0,0554	0,0006	0,0902	347	7,7	347	3,8	188	3,2	119	2,1	62	1,8	0,6	
BK-11_7	0,4090	0,0130	0,0547	0,0007	0,2548	347	9,4	343	4,1	162	2,3	108	3,2	53	2,2	0,7	
BK-11_8	0,3982	0,0074	0,0536	0,0005	0,1664	340	5,3	336	3,3	384	5,8	173	1,9	84	1,7	0,4	
BK-11_9	0,4060	0,0120	0,0542	0,0008	-0,1796	345	8,5	340	4,6	138	1,7	73	0,7	34	1,1	0,5	
BK-11_10	0,3960	0,0110	0,0539	0,0007	0,0159	337	7,9	338	4,4	249	4,9	117	1,8	63	1,6	0,5	
BK-11_11	0,4080	0,0110	0,0545	0,0006	0,0821	344	7,2	342	3,8	226	3,2	118	1,6	64	1,7	0,5	
BK-11_12	0,3960	0,0120	0,0538	0,0008	0,2457	338	8,5	338	5,1	176	2,6	104	1,5	59	1,8	0,6	
BK-11_13	0,3980	0,0100	0,0535	0,0006	0,0901	338	7,2	336	3,9	204	1,9	95	0,9	50	1,3	0,5	
BK-11_14	0,4090	0,0120	0,0546	0,0007	-0,0026	346	8,4	342	4,0	140	2,5	70	1,1	37	1,2	0,5	
BK-11_15	0,4062	0,0087	0,0542	0,0005	0,1045	344	6,0	340	3,2	235	5,1	176	4,3	91	2,6	0,8	
BK-11_16	0,4110	0,0120	0,0548	0,0007	-0,0395	347	8,8	344	4,0	157	2,6	75	1,0	39	1,1	0,5	
BK-11_17	0,4054	0,0083	0,0555	0,0006	0,2913	345	6,0	348	3,6	248	3,8	177	3,2	89	2,1	0,7	
BK-11_18	0,4065	0,0084	0,0544	0,0007	0,0664	345	6,0	341	4,0	291	4,0	130	1,6	63	1,5	0,4	
BK-11_19	0,3962	0,0086	0,0544	0,0006	0,2102	338	6,1	342	3,4	210	3,8	151	2,7	73	1,8	0,7	
BK-11_20	0,3970	0,0110	0,0541	0,0006	0,1433	339	7,7	340	3,8	188	2,3	125	1,6	61	1,5	0,7	
BK-11_21	0,3960	0,0120	0,0544	0,0007	0,1534	338	8,8	342	4,5	141	1,2	70	0,6	34	1,1	0,5	
BK-11_22	0,4129	0,0092	0,0554	0,0006	0,1874	349	6,4	347	3,5	236	5,6	113	3,0	56	1,6	0,5	
BK-11_23	0,4149	0,0085	0,0552	0,0005	0,1072	351	6,0	347	3,3	382	13,0	311	13,0	148	6,1	0,8	
BK-11_24	0,4118	0,0075	0,0555	0,0006	0,3021	350	5,4	348	3,5	454	3,4	237	1,8	110	2,6	0,5	
BK-11_25	0,4050	0,0110	0,0546	0,0007	0,1220	343	7,7	343	4,4	214	1,8	125	1,0	56	1,5	0,6	
BK-11_26	0,4110	0,0130	0,0544	0,0008	0,1091	346	8,9	341	4,8	188	5,3	119	4,2	54	2,2	0,6	
BK-11_27	0,4050	0,0110	0,0548	0,0007	0,1333	344	7,9	344	4,4	198	1,8	116	0,9	58	1,7	0,6	
BK-11_28	0,4100	0,0110	0,0546	0,0006	0,1102	346	7,5	343	3,9	223	2,8	123	1,4	59	1,6	0,6	
BK-11_29	0,4152	0,0083	0,0558	0,0006	0,3021	351	5,9	350	3,9	420	3,8	331	3,1	170	3,4	0,8	
BK-11_30	0,4180	0,0110	0,0554	0,0006	0,1354	351	7,5	348	3,6	199	3,4	82	1,2	42	1,3	0,4	
BK-11_31	0,4080	0,0130	0,0547	0,0007	0,1169	346	8,9	343	4,5	111	1,9	55	0,8	28	1,0	0,5	
BK-11_32	0,4055	0,0085	0,0547	0,0006	0,1441	344	6,1	344	3,7	217	2,2	149	1,0	75	1,6	0,7	
BK-11_33	0,4050	0,0130	0,0553	0,0009	0,2067	344	9,1	347	5,6	112	1,7	57	0,6	30	1,1	0,5	
BK-11_34	0,4060	0,0130	0,0551	0,0008	0,1502	345	9,0	346	5,0	214	3,5	151	2,4	74	2,4	0,7	
BK-11_35	0,4000	0,0100	0,0547	0,0007	0,1020	340	7,4	343	4,3	271	2,8	146	1,3	73	2,1	0,5	
BK-11_36	0,4129	0,0091	0,0558	0,0007	0,1834	351	6,5	350	4,3	360	8,0	254	6,3	139	4,5	0,7	
BK-11_37	0,4150	0,0130	0,0553	0,0007	0,0343	348	7,3	347	4,0	222	3,5	128	1,4	66	1,8	0,6	
BK-11_38	0,4120	0,0110	0,0550	0,0007	0,0954	346	7,1	345	3,9	206	4,9	112	2,0	60	2,0	0,5	
BK-11_39	0,3997	0,0093	0,0547	0,0007	0,2155	342	6,6	344	4,1	229	3,6	113	1,6	55	1,5	0,5	
BK-11_40	0,4070	0,0110	0,0544	0,0007	0,3432	345	7,8	341	4,2	169	1,7	96	0,8	46	1,4	0,6	
BK-11_41	0,4090	0,0120	0,0553	0,0007	0,1708	345	7,6	347	4	176	4,9	112	4,2	56	2,3	0,6	

Tabulka 2 – pokračování

	opravené izotopické poměry					získaná stáří (Ma)					obsah U, Th a Pb (ppm)						
	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{235}\text{U}^*}$	$\pm 2\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}}$	$\pm 2\sigma$	korel. chyby	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{235}\text{U}^*}$	$\pm 2\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}}$	$\pm 2\sigma$	Cca U	$\pm 2\sigma$	Cca Th	$\pm 2\sigma$	Cca Pb	$\pm 2\sigma$	Th/U	
	U-Pb kalibrační referenční materiál (konkordantní stáří 337,5 Ma $\pm$ 0,58 2s)																
Z_PL_1	0,3872	0,0051	0,0531	0,0005	0,2282	332	3,7	334	2,9	773	12	80	1,0	39	1,1	0,1	
Z_PL_2	0,3958	0,0055	0,0543	0,0005	0,4218	339	4,0	341	3,2	730	10	77	0,9	39	1,1	0,1	
Z_PL_3	0,3967	0,0048	0,0543	0,0005	0,4935	339	3,5	341	2,9	756	10	77	0,9	38	0,9	0,1	
Z_PL_4	0,4005	0,0043	0,0544	0,0005	0,3315	342	3,1	342	2,8	739	10	78	0,9	38	0,9	0,1	
Z_PL_5	0,3929	0,0047	0,0535	0,0005	0,3534	336	3,4	336	3,0	752	10	78	0,9	39	0,9	0,1	
Z_PL_6	0,4015	0,0056	0,0538	0,0005	0,3086	342	4,0	338	2,8	743	9	77	0,8	39	0,8	0,1	
Z_PL_7	0,3961	0,0049	0,0537	0,0005	0,5010	339	3,5	337	3,0	774	11	82	1,0	41	1,2	0,1	
Z_PL_8	0,3925	0,0052	0,0536	0,0005	0,1572	336	3,8	336	3,1	769	11	79	1,3	39	1,0	0,1	
Z_PL_9	0,4004	0,0050	0,0542	0,0005	0,2557	342	3,6	341	3,1	758	12	79	1,3	39	1,3	0,1	
Z_PL_10	0,3943	0,0056	0,0533	0,0005	0,0890	337	4,1	334	2,8	782	12	80	1,2	43	2,5	0,1	
Z_PL_11	0,3957	0,0058	0,0536	0,0006	0,2366	338	4,2	337	3,3	752	18	78	1,9	39	1,3	0,1	
Z_PL_12	0,3928	0,0052	0,0534	0,0006	0,4793	337	3,9	336	3,4	803	16	83	1,6	40	1,4	0,1	
Z_PL_13	0,3958	0,0054	0,0539	0,0005	0,4217	338	3,9	339	3,2	723	12	75	1,2	37	1,4	0,1	
Z_PL_14	0,3883	0,0053	0,0534	0,0005	0,1191	333	3,9	335	3,3	817	13	85	1,2	42	1,3	0,1	
Z_PL_15	0,3956	0,0063	0,0536	0,0005	0,0967	338	4,5	337	3,0	727	10	74	1,0	37	1,5	0,1	
Z_PL_16	0,3951	0,0061	0,0540	0,0005	0,3459	338	4,4	339	2,9	750	9	78	0,8	38	1,2	0,1	
Z_PL_17	0,3960	0,0052	0,0538	0,0005	0,2395	338	3,7	338	3,3	745	13	77	1,3	38	1,4	0,1	
Z_PL_18	0,3868	0,0053	0,0529	0,0005	0,2410	332	3,9	333	3,1	771	11	80	1,1	40	1,3	0,1	
Z_PL_19	0,3958	0,0055	0,0541	0,0005	0,2150	338	4,0	340	3,2	734	9	76	0,8	36	1,2	0,1	
Z_PL_20	0,3991	0,0060	0,0538	0,0005	0,4184	340	4,4	338	3,1	759	11	79	1,1	39	1,3	0,1	
Z_PL_21	0,3912	0,0054	0,0537	0,0005	0,4351	335	3,9	337	3,0	732	12	76	1,2	38	1,3	0,1	
Z_PL_22	0,3905	0,0050	0,0535	0,0005	0,3539	334	3,7	336	3,2	822	21	84	2,1	40	1,5	0,1	
Externí referenční materiál (konkordantní stáří 607,8 Ma $\pm$ 0,95 2s)																	
Z_GJ-1_1	0,8300	0,0130	0,0998	0,0009	0,1567	612	7	613	5	329	6,9	15	0,3	13	0,6	0,04	
Z_GJ-1_2	0,8120	0,0100	0,0985	0,0009	0,4759	603	6	606	5	311	6,6	13	0,2	12	0,5	0,04	
Z_GJ-1_3	0,8270	0,0100	0,0991	0,0008	0,2219	611	6	609	5	326	6,2	14	0,2	12	0,5	0,04	
Z_GJ-1_4	0,8150	0,0100	0,0978	0,0008	0,1858	605	6	601	5	317	5,6	14	0,2	11	0,5	0,04	
Z_GJ-1_5	0,8210	0,0100	0,0990	0,0008	0,5102	609	6	609	5	298	4,4	15	0,2	14	0,6	0,05	
Z_GJ-1_6	0,8150	0,0100	0,0992	0,0009	0,4431	606	6	610	5	301	3,5	15	0,2	14	0,7	0,05	
Z_GJ-1_7	0,8200	0,0120	0,0982	0,0009	0,3849	607	7	604	5	336	4,2	17	0,2	16	0,7	0,05	
Z_GJ-1_8	0,8170	0,0110	0,0991	0,0011	0,4182	606	6	609	7	468	6,7	25	0,4	24	1,0	0,05	
Z_GJ-1_9	0,8280	0,0180	0,0988	0,0010	0,1200	608	7	608	6	454	6,9	24	0,3	22	0,9	0,05	
Z_GJ-1_10	0,8072	0,0088	0,0984	0,0008	0,3058	601	5	605	5	459	7,8	25	0,4	20	0,8	0,05	
Z_GJ-1_11	0,8032	0,0093	0,0983	0,0008	0,4373	599	5	605	5	460	6,6	25	0,3	21	0,8	0,05	
Z_GJ-1_12	0,8032	0,0093	0,0983	0,0008	0,4373	608	5	612	5	604	9,0	34	0,5	30	1,1	0,06	
Z_GJ-1_13	0,8032	0,0093	0,0983	0,0008	0,4373	605	5	609	5	650	11,0	38	0,6	32	1,2	0,06	
Z_GJ-1_14	0,8032	0,0093	0,0983	0,0008	0,4373	604	6	608	5	473	9,4	25	0,4	24	1,0	0,05	
Z_GJ-1_15	0,8032	0,0093	0,0983	0,0008	0,4373	615	6	616	5	454	9,4	24	0,4	22	0,9	0,05	
Z_GJ-1_16	0,8032	0,0093	0,0983	0,0008	0,4373	613	7	608	5	443	9,6	23	0,5	22	1,1	0,05	
Z_GJ-1_17	0,8032	0,0093	0,0983	0,0008	0,4373	613	7	611	6	580	7,8	34	0,5	28	1,8	0,06	
Z_GJ-1_18	0,8032	0,0093	0,0983	0,0008	0,4373	612	6	610	5	571	10,0	35	0,6	30	1,7	0,06	

Tabulka 2 – pokračování

	opravené izotopické poměry					získaná stáří (Ma)					obsah U, Th a Pb (ppm)					
	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{235}\text{U}^*}$	$\pm 2\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}}$	$\pm 2\sigma$	korel. chyby	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{235}\text{U}^*}$	$\pm 2\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}}$	$\pm 2\sigma$	Cca U	$\pm 2\sigma$	Cca Th	$\pm 2\sigma$	Cca Pb	$\pm 2\sigma$	Th/U
										(abs.)	(abs.)	(abs.)	(abs.)	(abs.)	(abs.)	poměr
Z_GJ-1_19	0,8032	0,0093	0,0983	0,0008	0,4373	610	6	613	5	552	10,0	34	0,5	29	1,2	0,06
Z_GJ-1_20	0,8032	0,0093	0,0983	0,0008	0,4373	606	6	610	5	386	7,5	21	0,4	19	0,9	0,05
Z_GJ-1_21	0,8032	0,0093	0,0983	0,0008	0,4373	603	6	607	5	357	5,3	20	0,3	16	0,6	0,05
Z_GJ-1_22	0,8032	0,0093	0,0983	0,0008	0,4373	603	5	605	5	346	5,0	19	0,3	16	0,6	0,06

Chemické složení křemenného dioritu zachycuje tab. 1. S obsahem  $\text{SiO}_2$  60,9 % je hornina výrazně bazičtější než datovaný vzorek granodioritu sesterského pně u Padrtě (Žák et al. 2014) a je srovnatelná s bazičtějšími členy sázavské suity, vyplňujíc mezeru mezi tonality a diority zjištěnými v oblasti zásobníku plynu v Brodu u Příbrami (Sokol et al. 2000). V rámci analýz graficky znázorněných v práci Klomínského (2010) padá datovaný vzorek do pole v bohatínském pni nejhojněji obsaženého horninového typu. Podobně jako padřské těleso se však od sázavské i blatencké suity středočeského plutonického komplexu vzorek z Bohutína odlišuje neobvykle nízkým obsahem Sr.

## Výsledky datování

Studium studovaných zirkonů pomocí katodové luminiscence (CL) ukázalo na přítomnost dominantní magmatické oscilační zonality (obr. 1), typické pro krystalační růst z magmatu. Některá zrna vykazují vzácnější zonalitu, na obrázku 1b je například vnitřní část zrna sektorově zonální (typická pro magmatické zirkony) a úzký oscilačně zonální lem. U většiny zrn (například obr. 1a–e) je vidět rekrystalizace (resorpce) původní oscilační zonality. CL snímky zirkonů nenesou žádné zjevné stopy přítomnosti zděděných jader, které se nepodařilo identifikovat ani během U-Pb datování. Tato charakteristická zonalita studovaných zirkonů byla zastižena ve všech morfologických typech zrn: prizmatických (obr. 1a), jehličkách (obr. 1b) nebo krátkých až oválných (např. obr. 1d, e). Obsahy U studovaných zirkonů se pohybují v rozmezí zhruba 150–450 ppm, Th cca 70–330 ppm a průměrný poměr Th/U je 0,6, což odpovídá typickým hodnotám pro zirkony z granitoidních tavenin.

Zjištěná stáří zmíněných morfologických populací 41 čirých zirkonů leží na konkordii v rozmezí cca 335–350 Ma a dávají vážený průměr konkordantního stáří 344,2 ± 0,6 Ma (s chybou 2σ). Výsledné stáří je interpretováno jako stáří krystalačního bohatínského křemenného dioritu.

## Diskuse a závěr

V severním okolí hlavních intruzivních mas středočeského plutonu se v příbramské rudní oblasti nachází kromě bohu-

tínského pně několik dalších drobnějších intruzí. Nejvíce na SZ je to drobné tělesko granodioritu u bývalé obce Kolvín nedaleko Skořic, zjištěné J. Litochlebem (in Žák et al. 2014). V širším okolí Padřských rybníků byl nedávno zkoumán padřský peň, složený z nejméně dvou typů hornin, padřského granodioritu a teslínského leukogranitu (Žák et al. 2014). Dále směrem na východ vystupuje bohatínský peň a těsně severně od něj plošně nepatrné intruzivní tělesko u hájovny Prokop (Bambas 1990). Další rozměrem nevelký výskyt hlubinné vyvřeliny odpovídající pyroxenicko-amfibolickému dioritu byl zjištěn v hluboké partií ložiska Březové Hory, na 36. patře severní sledné Václavské žíly (Dudek – Fediuk 1956b).

Ze všech těchto malých intruzí byl zatím metodou U-Pb na zirkonech datován pouze granodiorit padřského intruzivního pně ( $342,8 \pm 1,1$  Ma; Žák et al. 2014). Stáří zirkonů hlavní intruzivní fáze bohatínského pně  $344,2 \pm 0,6$  je padřskému pni velmi blízké. Současně je získané stáří velmi blízké dřívějšímu Ar-Ar stáří z amfibolu z tmavé enklávy v bohatínském tělese –  $348,5 \pm 0,5$  Ma (Žák et al. 1998). Pokud z tohoto datování použijeme nikoliv celé plato, ale jen 9 nejvyšších teplotních kroků uvolňování argonu ( $1275$ – $1600$  °C), vychází stáří vypočtené metodou izochrony  $342,0 \pm 0,3$  Ma a shoda s U-Pb datováním zirkonů je ještě lepší.

Argonové stáří je ovšem nikoliv stáří intruzivní, ale oka- mžik zchladnutí horniny pod tzv. blokovací nebo uzavírací teplotu (v případě amfibolu zhruba  $530 \pm 40$  °C), tedy teplotu, kdy již z minerálu přestává argon unikat. Pro systém U-Pb a minerál zirkon je obecně uzavírací teplota  $\geq 1000$  °C (daná hornina zřejmě ani tak vysokou krystalační teplotu neměla). Získaná stáří představují odpovídající časovou posloupnost.

Lze tedy předpokládat, že padřský a bohatínský peň jsou dvě „sesterská“ intruzivní tělesa, vyznačující se v místo- váním v blízkosti velkých regionálních zlomů, která zřejmě pronikla do sedimentů barrandienského neoproterozoika a částečně kambria ve stejné fázi strukturálního vývoje toho- to prostoru. Podobná je i velikost obou těles v úrovni sou- časného povrchu (padřské ~5 km<sup>2</sup>, bohatínské ~3,6 km<sup>2</sup>) i jejich zřetelná litologická variabilita. V rámci vývoje ce- lého středočeského intruzivního komplexu patří data stáří padřského a bohatínského pně spíše do skupiny mladších intruzí. Dřívější údaje o mnohem větším, silurském stáří bohatínského pně lze tedy jednoznačně vyloučit. Byly zřejmě způsobeny přírodní kontaminací vzorků argonem,

který se uvolnil při intruzi tělesa z okolních mnohem starších hornin proterozoika.

*Poděkování. Děkujeme J. Klomínskému za poskytnutí datovaného vzorku a cenných publikovaných i nepublikovaných informací. Výzkum byl proveden jako součást širších prací zaměřených na zpřesnění chronologie magmatických a hydrotermálních událostí v příbramské rudné oblasti, které jsou financovány projektem GA ČR 13-15390S. Recenzentům K. Hrdličkové a V. Žáčkovi děkujeme za připomínky, které zlepšily kvalitu rukopisu.*

## Literatura

- BAMBAS, J. (1990): Březohorský rudní revír. – 200 str. Horn. Příbram ve vědě a technice. Příbram.
- DUDEK, A. – FEDIUK, F. (1956a): Bohutínský křemenný diorit. – Acta Univ. Carol., Geol. 2, 149–169.
- DUDEK, A. – FEDIUK, F. (1956b): Zpráva o výzkumu tělesa bohutínského křemenného dioritu. Diorit z dolu Anna na Březových Horách. – MS Čes. geol. služba. Praha.
- JACKSON, S. E. – PEARSON, N. J. – GRIFFIN, W. L. – BELOUSOVA, E. A. (2004): The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology. – Chem. Geol. 211, 47–69.
- KLOMÍNSKÝ, J. (2010): Bohutínský tonalitový peň – příklad malé intruze s vysokým stupněm horninové diferenciace. – Zpr. geol. Výzk. v Roce 2010, 153–157.
- PATON, C. – HELLSTROM, J. – PAUL, B. – WOODHEAD, J. – HERGT, J. (2011): Iolite: freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data. – J. Anal. Atom. Spec. 26, 2508–2518.
- PATON, C. – WOODHEAD, J. D. – HELLSTROM, J. C. – HERGT, J. M. – GREIG, A. – MAAS, R. (2010): Improved laser ablation U-Pb zircon geochronology through robust downhole fractionation correction. – Geochem. Geophys. Geosys. 11: Q0AA06, doi: 10.1029/2009gc002618.
- SLÁMA, J. – KOŠLER, J. – CONDON, D. J. – CROWLEY, J. L. – GERDES, A. – HANCHAR, J. M. – HORSTWOOD, M. S. A. – MORRIS, G. A. – NASDALA, L. – NORBERG, N. – SCHALTEGGER, U. – SCHOENE, B. – TUBRETT, M. N. – WHITEHOUSE, M. J. (2008): Plešovice zircon – A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. – Chem. Geol. 249, 1–35.
- SOKOL, A. – DOMEČKA, K. – BREITER, K. – JANOUŠEK, V. (2000): Underground gas storage near Příbram – a source of new information about granitoids of the Central Bohemian Pluton. – Bull. Czech Geol. Surv. 75, 89–104.
- STOČES, B. (1917): Studie o rudním obvodu bohutínském. Část I. Křemity diorit biotiticko-amfibolický z Bohutína. – Rozpr. Čes. Akad. Věd, Tř. II 26, 12.
- URBAN, K. (1937): Geologie rudního ložiska v Bohutíně u Příbramě a jeho okolí. – Věst. St. geol. Úst. Čs. Republ. 13, 106–146.
- VLAŠÍMSKÝ, P. (1982): The Příbram ore district; rock geochemistry and potential sources of hydrothermal mineralization. – Sbor. geol. Věd, ložisk. Geol. 24, 49–99.
- ŽÁK, K. – SVOJTKA, M. – BREITER, K. – ACKERMAN, L. – ZACHARIÁŠ, J. – PAŠAVA, J. – VESELOVSKÝ, F. – LITOCHLEB, J. – ŘURIŠOVÁ, J. – HALUZOVÁ, E. (2014): Padrt Stock (Teplá-Barrandian Unit, Bohemian Massif): Petrology, geochemistry, granodiorite U-Pb zircon dating, and Re-Os age and origin of related molybdenite mineralization. – J. Geosci. 59, 351–366.
- ŽÁK, K. – VLAŠÍMSKÝ, P. – SNEE, L. W. (1998):  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  cooling ages of selected rocks of the Příbram ore region and the question of timing of sulfidic hydrothermal mineralization. – Zpr. geol. Výzk. v Roce 1997, 172–173.