ISSN 1211-8796

Acta Mus. Moraviae, Sci. geol.
CVI (2021): 2, 161–170, 2021

CHARAKTERISTIKA PSEUDOFULGURITU ZE ŽATČAN U BRNA, ČESKÁ REPUBLIKA

CHARACTERIZATION OF PSEUDOFULGURITE FROM ŽATČANY NEAR BRNO, CZECH REPUBLIC

EVA VÍŠKOVÁ, STANISLAV HOUZAR, KAREL SLAVÍČEK

Abstract

Víšková, E., Houzar, S., Slavíček, K., 2021: Charakteristika pseudofulguritu ze Žatčan u Brna, Česká republika. – Acta Musei Moraviae, Scientiae geologicae, 106, 2, 161–170 (with English summary).

Characterization of pseudofulgurite from Žatčany near Brno, Czech Republic

Pseudofulgurite from Žatčany near Brno originated after a fall of high voltage cables (22 kV) at several intermittent places where they touched the ground (partly anthropogenic loam-sandy sediment with gravel admixture). Branched, tubular and irregular aggregates, up to 10 cm in size, were formed in similar way as some fulgurites. Pseudofulgurite is brown-black in color, with numerous bubbles of the order of mm in size, in the case of tubular shapes with a central rounded and square channel. It consists of several types of glasses, including rare lechatelierite. They contain sporadically submicroscopic metal balls composed of native Fe, alternatively with a proportion of P, Ni, Si, Co and Cr, demonstrating a strongly reduced environment. Rather rare crystalline phases have the composition of Ca-Fe-Al-Si (±Ti), also relics of quartz and sporadic biotite can be observed locally. A lower K_2O / Na_2O ratio of 2.53–0.13 and a relatively high proportion of highly volatile S may also indicate a relatively lower melting point.

Key words: pseudofulgurite, chemical composition, Czech Republic

Eva Víšková, Department of Mineralogy and Petrography, Moravian Museum, Zelný trh 6, 659 37 Brno, Czech Republic, eviskova@mzm.cz

Stanislav Houzar, Department of Mineralogy and Petrography, Moravian Museum, Zelný trh 6, 659 37 Brno, Czech Republic

Karel Slavíček, Department of Geological Sciences, Masaryk University, Brno, Kotlářská 2, 611 37 Brno, Czech Republic

1. ÚVOD

Přírodní skla představují převážně produkty relativně vysokoteplotních tavenin různého chemického složení, utuhlých v podmínkách nepříznivých pro vznik krystalů. Proto jsou na Zemi mnohem vzácnější než krystalické minerály nebo horniny a naopak hojná např. na Měsíci či Marsu. Důvodem jsou relativně vysoké obsahy vody a jiných volatilních komponent na Zemi, které podporují růst krystalů a naopak devitrifikaci vzniklých skel (např. Friedman a Long 1984, Zemann 1988). Přírodní skla vznikají z likvidního stavu podchlazením, postupným přechodem ze stavu kapalného do stavu pevného; jsou definována jako pevná amorfní látka s hodnotou viskozity nad 10^{12} Pa.s. ($N.s.m^{-2}$). Všechna skla jsou v podmínkách zemského povrchu nestabilní (O'Keefe 1984, Bouška *et al.* 1987, McCloy 2019).

Za základní rozlišující vlastnost přírodních skel považuje O'Keefe (1984) rychlost vzniku: rozlišuje (a) fulguritová skla; (b) diaplektická skla (vzniklá šokovým tlakem, např. při impaktech, např. maskelynit); (c) impaktová skla vzniklá tavením při dopadu velkých kosmických těles (libyjské a darwinské sklo); (d) tektity (včetně vltavínů); (e) vulkanická skla pozemská, měsíční a planetární (např. obsidiány, perlity, tachylit, „Peléiny vlasy"). Jiná skla mohou vznikat např. třením při obřích horských sesuvech, tzv. frictionity neboli pseudotachylity (Preuss *et al.* 1988), při požárech uhelných slojí a ložisek ropy a kontaktní metamorfózou, tzv. buchity (Grapes 2010). Za skla jsou také někdy pokládány tzv. metamiktní nerosty, jež vznikají rozpadem krystalových mřížek minerálů v důsledku radioaktivního záření (Konta a Saul 1976, O'Keefe 1984, Bouška a Konta 1986, Bouška *et al.* 1987). Část skel nalézaných v přírodě vznikla i *za spoluúčasti člověka*. Tak např. je stále studováno sklo pokusných atomových výbuchů, např. známý trinitit, resp. „Trinity glass" z Alamogordo, Mexico (např. Bellucci *et al.* 2014, Eby *et al.* 2015, Roberts *et al.* 2019) a lokálně jsou nalézána některá skla neznámého původu (*„pit glass"* ze Srí Lanky nebo *„Malawi glass"* z Afriky), jako produkty stepních požárů, prohořívání uhelných odvalů či pálení vápence (Bouška a Konta 1986, Grapes 2010).

2. CHARAKTERISTIKA FULGURITŮ A PSEUDOFULGURITŮ

K nejrychleji vznikajícím přírodním sklům náležejí **fulgurity**, vznikající přetavením písku, půdy nebo horniny elektrickým výbojem. Jak napovídá jeho latinské jméno (fulgur = blesk), vzniká úderem blesku do písku nebo do vrcholků skal. Mívá podobu duté trubice, jejíž délka může být i několik metrů a která se někdy stromovitě větví. Nejčastějším místem nálezu fulguritů jsou pouštní oblasti a písečné pláže, kde sypký materiál snadno denudoval a odhalil tak zpevněný fulgurit. Nenápadné „skalní fulgurity", představují jamky, paprsčité trhliny a otavené horniny, které bývají nejlépe vyvinuté na pískovcových skalách (u nás např. Pravčická brána; Cílek 1997), ale i na jiných horninách, na hůře dostupných horských vrcholech (Moravec 2003). Mnohem vzácnější je typ fulguritové hmoty, který tvoří deformované kapky nebo kuličky (tzv. exogenní fulgurity; Hrazdil *et al.* 2002, Pasek *et al.* 2012, Veiga *et al.* 2021). Velká část terčového materiálu se za vysokých teplot, často převyšujících 1400, 2000 až i 2950°C (bod varu SiO_2), vypaří a tlak v místě výboje může dosáhnout i 20–25 GPa. Sklo fulguritu obsahuje vždy příměs spečeného písku či jiného podobného materiálu. Typické jsou stopy silně redukovaných fází, jako je ryzí železo, nikl a karbidy a fosfidy kovů. V případě vzniku z křemenného písku je hlavní složkou fulguritu lechatelierit (křemenné sklo); byl však zjištěn i coesit, maskelynit, šokové lamely v zrnech křemene, elementární křemík, fullereny aj. (Bouška *et al.* 1987, Feldman 1988, MacDonald *et al.* 2004, Gieré *et al.* 2015). Podrobný přehled problematiky fulguritů u nás nejdříve podal Čirvinskij (1922), na některé pozdější výskyty v českých zemích upozornili Nováček (1940, 1941), Kratochvíl (1957), Rost (1963), Bouška *et al.* (1987) a Hrazdil *et al.* (2002).

Vzhledem k výjimečným podmínkám vzniku těchto skel, resp. jejich srovnávání se skly impaktového původu včetně tektitů jsou fulgurity předmětem detailního studia v současnosti (např. Crespo *et al.* 2009, Pasek *et al.* 2012, Gieré *et al.* 2015, Elmi *et al.* 2017, Pasek a Pasek 2018). Jejich vznik byl odedávna napodobován i experimentálně (viz Čirvinskij 1922, Fickert a Pasker 2013, aj.).

Pseudofulgurity jsou skla, která vznikají elektrickým výbojem do země, pocházejícím z přetržených drátů vysokého napětí (cca 15–20 000 V). Svými vlastnostmi se pseudofulgurity podobají pravým fulguritům, zvláště v případech, kdy šlo o ***kombinaci úderu blesku do sloupů s vysokým napětím*** a následným výbojem u paty stožáru nebo v místech dotyku země s dráty elektrického vedení přetrženými při bouřce (Nováček 1940, Brandstätter *et al.* 2009, Kassi *et al.* 2013). Pseudofulgurity vzniklé ***bez působení blesku***, pouze při pádu drátů pod vysokým napětím, které jistě nebudou vzácností, jsou však z našeho území doloženy např. ve sbírce Muzea Vysočiny, Třebíč, s lokalizací okolí Hrotovic na Třebíčsku

(*tento historický nález je zmíněn v publikaci* BOUŠKY *et al. 1987 – s lokalizací Dukovany, patrně chybnou a s nesprávným rozměrem 5 mm*).

V každém případě však pseudofulgurity nebývají příliš často blíže studovány. Vzhledem k jejich možnému využití při diskusi vzniku podobných ultravysokoteplotních (UHT) nebo i ultravysokotlakých (UHP) „šokově vzniklých" přírodních skel byl tento fakt hlavním podnětem ke zpracování našeho příspěvku.

3. METODIKA

Studované pseudofulgurity pocházejí z Žatčan u Brna, kde vznikly po pádu přetržených drátů elektrického vedení s vysokým napětím 22 kV. Pozornost byla věnována jak jejich morfologii, tak také jejich mineralogii a chemickému složení. Byly zhotoveny leštěné výbrusy a studovány optickým mikroskopem v procházejícím i odraženém světle. Byla také provedena fotodokumentace struktury, textury i minerálních fází v režimu zpětně odražených elektronů (BSE) na elektronové mikrosondě a vybrána místa pro chemické analýzy skla i krystalických fází.

Chemismus byl studován dvěma metodami. První z nich byla elektronová mikrosonda Cameca SX100 (Laboratoř elektronové mikroskopie a mikroanalýzy, společné pracoviště MU a České geologické služby, Brno). Analýzy byly provedeny ve vlnově disperzním módu (WDX) za těchto podmínek: urychlovací napětí 15 kV, proud svazku 10 nA, průměr svazku 4 μm a 10 μm, načítací čas 10-30 s. Jako standardy byly použity syntetické fáze a dobře definované minerály (v závorce jsou uvedeny použité linie): albit (NaKα), wollastonit (SiKα, CaKα), vanadinit (ClKα, VKα), baryt (BaLα), titanit (TiKα), sanidin (AlKα), gahnit (ZnKα), pyrop (MgKα), chromit (CrKα), ortoklas (KKα), almandin (FeKα), spessartin (MnKα), topaz (FKα), $SrSO_4$ (SrLα), Ni_2SiO_4 (NiKα), $ScVO_4$ (ScKα), Rb-leucit (RbLα) a polucit (CsLα). Změřená data byla upravena PAP korekcí podle POUCHOU a PICHOIR (1985).

Druhou použitou metodou byla energiově disperzní rentgen-fluorescenční spektrometrie (ED-XRF) provedná pomocí spektrometru Rigaku NexCG. Přístroj disponuje Pd anodou o výkonu 50 W a SSD detektorem s rozlišením do 145 eV. Pro lepší poměr signal-to-noise využívá nepřímé excitace pomocí sekundárních terčíků. Délka měření činila 120 sekund na každý terčík. Kvantifikace analýzy byla provedena pomocí kalibrační knihovny pro půdy, jíly, nezpevněné sedimenty a keramiku. Vzorek pseudofulguritu byl před analýzou upraven – nejdříve byla oddělena tavenina od sedimentu. Poté byly separované vzorky namlety planetovým mlýnem na analytickou jemnost a následně analyzovány v podobě práškových lisovaných tablet.

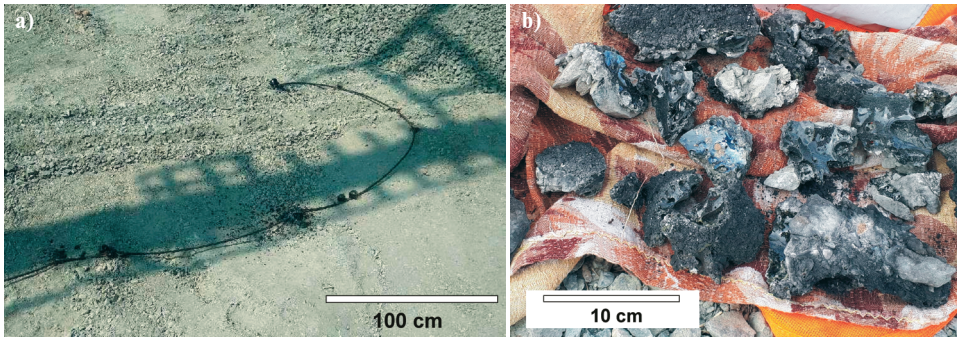
4. VÝSLEDKY

4.1. Charakteristika místa nálezu

V srpnu roku 2018 došlu u obce Žatčany k pádu drátů vysokého napětí (22 kV) do hlinito-písčitého materiálu s podílem drobných klastů hornin (částečně *štěrkodrti* antropogenního původu). V bezprostředním místě pádu se začaly v místech dotyku drátu se zemí tvořit přibližně kulovité sklovité útvary přetavené hmoty, které v důsledku rozpínání bublin a pnutí ihned praskaly (obr. 1, ústní sdělení oznamovatele).

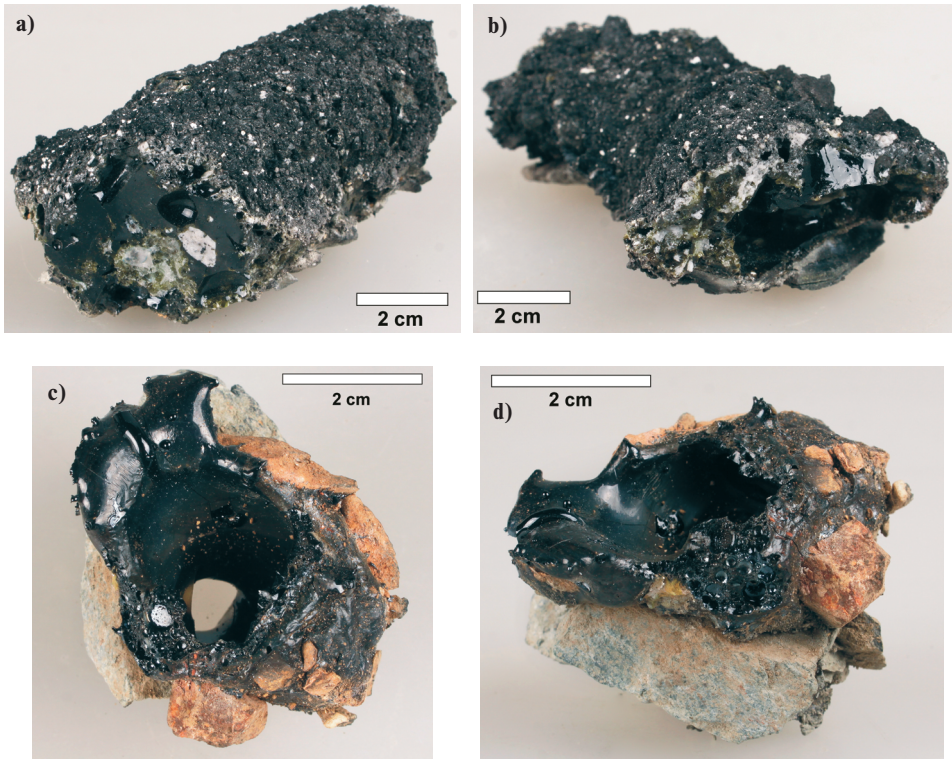
Následující den po pádu drátů bylo dodatečně na několika lokálních místech po odkrytí tenké povrchové vrstvy, nalezeno větší množství zesklovatělých kousků horniny. Místa nálezu odpovídala kontaktu drátu s povrchem, na jiném místě k jejich tvorbě nedošlo.

Pseudofulgurity se tvořily průměrně do 20 cm od místa kontaktu, do hloubky maximálně 15 cm. Hvězdicovitě se větvily, avšak takové celotvary nebyly v době dokumentace už dostupné – byly rozlámány při provozu vozidel. Podkladem („terčovou horninou") je částečně antropogenní nezpevněný hlinito-písčitý sediment s příměsí štěrku.



Obr. 1. a) Styk drátů vysokého napětí se sedimentem, kde lokálně vznikly pseudofulgurity; b) fragmenty pseudofulguritů.

Fig. 1. a) Contact of high voltage cables with sediment where pseudofulgurities were formed locally; b) pseudofulgurite fragments.



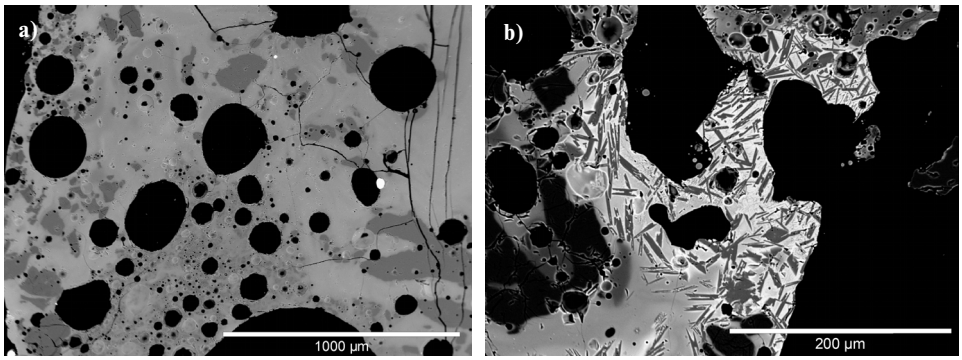
Obr. 2. Dva hlavní typy pseudofulguritů, lokalita Žatčany, Sbírka MZM (foto J. Cága). a) trubičkovitý masivní pseudofulgurit s otevřenými bublinami. b) trubičkovitý pseudofulgurit s otevřenou bublinou a kanálkem. c) sklovitá část vzorku s centrálním kanálkem. d) sklovitá část pseudofulguritu s klasty hornin přitavenými na povrchu.

Fig. 2. Two main types of pseudofulgurities, locality Žatčany, collection of MZM (photo J. Cága). a) tubular massive pseudofulgurite with open bubbles. b) tubular pseudofulgurite with open bubble and channel. c) the glassy portion of the sample with the central channel. d) pseudofulgurite glass with rock fragments attached to the surface.

4.2. Makroskopický a mikroskopický popis pseudofulguritu

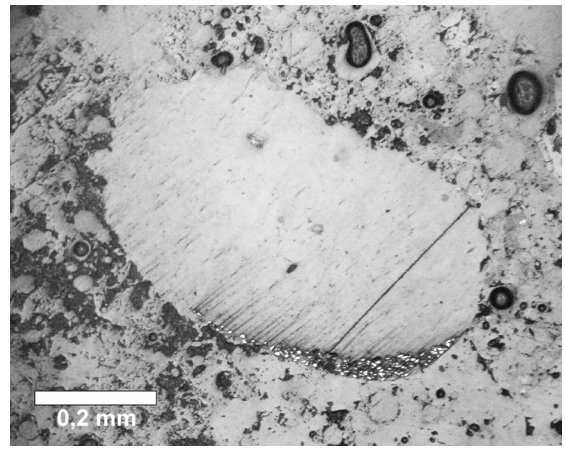
Lokálně nalezené pseudofulgurity měly ve většině případů zachovaný trubicovitý tvar, který je tvořen černě lesklou mnohdy proplyněnou hmotou (bubliny i otevřené prostory) v jehož středu probíhá otevřený kanál. Při okraji pseudofulguritu je spečená jemnozrnná frakce původního materiálu, do kterého dráty dopadly. Okraj pseudofulguritu mnohdy tvoří drobné nepřeměněné úlomky hornin. Sklo je sytě černé, více či méně bublinaté a jen místy zabarvené do zelena s relikty částečně přetavených ostrohranných zrn křemene. Velikost vzorků se pohybovala od desítek milimetrů až maximálně 10 cm. Ve všech případech došlo po čase vlivem vnitřního pnutí k rozpadu pseudofulguritů.

Mikroskopicky mají studované pseudofulgurity masivní až vezikulární texturu, tvořenou několika chemicky odlišnými varietami skla (obr. 3a) a vzácněji žilkovitým lechatelieritem. Ve sklovité základní hmotě jsou při okraji pseudofulguritu hojnější anhedrální rozpukaná zrna křemene, velmi vzácně i lišty biotitu velikosti pod 0,2 mm. Lokálně jsou hojnější submikroskopické subhedrální inkluze blíže neurčených Ca-Fe-Al-Si fází s kolísavým složením a metalické fáze tvořené Fe, ±Ni, ±P (obr. 3b). Ty se někdy soustřeďují na okraje bublin, hranice zrn a úzké žilky (obr. 4).



Obr. 3. Silně bublinaté sklo s různým chemickým složením a inkluzemi (BSE foto P. Gadas). a) Chemicky odlišné typy skel včetně drobných bílých inkluzí odpovídajících Fe-P fázím. b) Mikrokrystalické lištové inkluze o složení Ca-Fe-Al-Si (± Ti) ve skle na okraji pseudofulguritu.

Fig. 3. Highly bubble glass with various chemical composition and inclusions (BSE photo P. Gadas). a) Chemical various glass types including small white inclusions corresponding to Fe-P phases. b) Microcrystalline inclusions with the composition of Ca-Fe-Al-Si (± Ti) in the glass on the edge of pseudofulgurite.



Obr. 4. Inkluze bohaté železem na styku bubliny se sklem (odražené světlo, rovnoběžné nikoly PPL, foto J. Toman).

Fig. 4. Fe-rich inclusion at contact of bubble with glass (reflected light, PPL, photo J. Toman).

4.3. Chemické složení skla

Složení pseudofulguritu, jak se dá očekávat u elektrického výboje do velikostně nevytříděného hlinito-písčitého sedimentu s příměsí štěrku, s nejednotným chemickým složením, je silně variabilní ve všech složkách. Na rozdíl od fulguritů, vzniklých přetavením čistého křemenného písku, byl zastižen jen místy lechatelierit, složením blízký čistému SiO_2 (0,06 FeO, stopy Mn, Ni a V), ojediněle se zvýšeným obsahem Al_2O_3 a FeO, vedle alkálií, s převažujícím K nad Na (tab. 1, analýza č. 6).

Ostatní analýzy odpovídají převážně sklům intermediálního až acidního složení (54–70 hm. % SiO_2). V chemických analýzách dále dominuje Al_2O_3 v množství 13,00–18,67 hm. %. Obsahy ostatních oxidů prvků jsou silně variabilní; FeO 1,61–10,14; CaO 1,93–10,32; MgO 0,90–9,20 a MnO 0,10–0,27; vše v hm. %. Pravidelnější jsou obsahy titanu (tab. 1), lokálně je zastoupen v nepatrném množství Cr (~ 0,02–0,06 Cr), Zn (≤0,07), Ni ≤0,04), V (≤0,03) a Ba (≤0,1 Ba); vše v hm. %.

Tabulka 1. Chemické analýzy skla pseudofulguritu ze Žatčan.
Table 1. Chemical analysis of pseudofulgurite glass from Žatčany.

hm.%/wt.%	1	2	3	4	5	6	7*
SiO_2	60,10	53,96	64,82	56,06	69,44	92,85	53,10
TiO_2	0,75	0,76	0,67	0,87	0,37		2,06
Al_2O_3	13,00	13,48	13,38	16,30	18,67	3,03	20,40
Cr_2O_3	0,08	0,09		0,06	0,00		0,09
FeO	7,01	9,52	4,02	10,14	1,61	1,19	11,30
MnO	0,12	0,23	0,08	0,27	0,10		0,17
MgO	6,36	9,20	2,89	6,41	0,90	0,37	4,30
CaO	9,45	10,32	9,62	6,13	1,93	0,03	2,50
ZnO			0,09	0,08			
Na_2O	1,68	1,66	1,73	4,06	6,24	0,55	1,32
K_2O	1,75	0,97	2,98	0,51	0,82	1,39	4,30
Celkem/total	100,45	100,32	100,47	101,05	100,12	99,50	99,54

* černý pseudofulgurit, Kaltenbach, Rakousko; BRANDSTÄTTER *et al.* (2009)
* black pseudofulgurite, Kaltenbach, Austria; BRANDSTÄTTER *et al.* (2009)

Obsahy alkalických kovů se pohybují v rozmezí 1,66–6,24 hm. % Na_2O a 0,51–2,98 K_2O, přičemž obsah Na je relativně vysoký. Převaha K_2O nad Na_2O, typická pro impaktity (i fulgurity) se uplatnila jen ojediněle, poměr K_2O/Na_2O 2,53–0,13 (tab. 1, analýzy 4 a 6).

Diagram (obr. 5), vycházející z analytických údajů získaných metodou metodou ED-XRF (tab. 3.) umožnil porovnat složení terčové horniny se sklem pseudofulguritu.

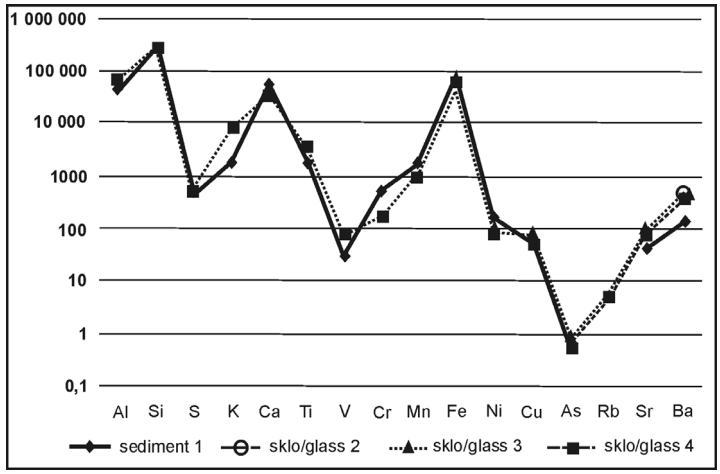
Ojedinělé analýzy krystalických uzavřenin se vyznačují oproti složení převažujícího skla zejména nízkým obsahem SiO_2 (46– 49 hm. %), vysokým obsahem Al_2O_3 (30–32 % hm. %), CaO (15–17 hm. %) a Na_2O (1,0–1,7 hm. %). Část lištových inkluzí obsahuje mírně zvýšené množství Mn (~ 1 hm. % MnO) a Ti (~ 0,10 hm. % TiO_2). Část uzavřenin lze považovat velmi pravděpodobně za odmíšeniny ryzích kovů s kolísavým podílem P, Ni a Si vzniklých v silně redukčním prostředí skloviny. Jde o globule o složení Fe-P (90–96 % Fe, 7–9,5 % P, Ni 0,15–13,51; vše v hm. %), vzácně Fe-Si (15–16 hm. % Si, (±Cr, ±Ni) a jen ojediněle o globule relativně čistého Fe (≤ 0,7 hm. % Ni) nebo chudé Fe (~ 43 hm. %) zato s vysokým obsahem Cr (≤ 9 hm. %). Vybrané analýzy jsou obsaženy v tabulce 2.

Tabulka 2. Reprezentativní analýzy krystalických i kovových inkluzí ve skle pseudofulguritu.
Table 2. Representative analyses of both crystalline and metalic inclusions inside pseudofulgurite glass.

hm.%/wt.%	silikáty/silicates		hm.%/wt.%	Fe-bohaté fáze/Fe-rich phases			
SiO_2	49,59	46,28	Co	0,5	0,2	1,1	0,1
TiO_2	0,10	0,13	Cr				8,8
Al_2O_3	32,04	29,52	Cu	0,1	0,4	0,6	0,4
FeO	1,26	7,21	Fe	90,8	90,9	77,4	43,1
MnO	0,20	0,80	Ni	2,8	0,2	13,5	4,9
MgO	0,20	0,67	P	6	9,5	7,3	0,1
CaO	16,61	14,95	S	0,6	0,1	0,4	0,3
K_2O	0,68	0,78	Si				16,1
Na_2O	1,69	0,96					
Total	102,37	101,30		100,8	101,3	100,3	73,8

Tabulka 3. Srovnání chemického složení sedimentu se sklem pseudofulguritu (metoda ED-XRF; ND – nebyl detekován).
Table 3. Comparison of chemical composition of sediment with pseudofulgurite glass (ED-XRF method; ND – not detected).

	sediment	sklo	sklo	sklo
hm. %/wt.%	**sediment**	glass	glass	glass
Al_2O_3	**8,14**	9,73	10,41	10,58
SiO_2	**54,77**	52,41	54,55	54,98
SO_3	**0,11**	0,11	0,11	0,11
K_2O	**0,21**	0,93	0,95	0,93
Na_2O	**ND**	ND	ND	ND
CaO	**6,09**	5,30	5,36	5,34
TiO_2	**0,29**	0,59	0,59	0,59
V_2O_5	**0,01**	0,01	0,01	0,01
Cr_2O_3	**0,07**	0,02	0,02	0,02
MnO	**0,21**	0,14	0,14	0,13
FeO	**8,70**	6,79	6,82	6,82
NiO	**0,02**	0,01	0,01	0,01
CuO	**0,01**	0,01	0,01	0,01
As_2O_3	**ND**	0,00	0,00	0,00
Rb_2O	**ND**	0,00	0,00	0,00
SrO	**0,01**	0,01	0,01	0,01
BaO	**0,02**	0,06	0,05	0,04



Obr. 5. Porovnání chemického složení sedimenty a tří druhů skel pseudofulguritu.
Fig. 5. Comparison between chemical composition of sediments and three types of pseudofulgurite glass.

Pseudofulgurit je vedle dominujícího SiO_2, relativně bohatý na oxidy Ca, K, Ti, Mn a Fe. Za zmínku stojí i vysoký obsah síry, jako volatilní komponenty značně neobvyklý. Sklo je oproti složení výchozí horniny obohacené o K a ochuzené o Ca, Cr, Mn a Ni. Poměr Al/Si a podíl S a Fe jsou podobné, vyšší je obsah Ba, Cu, Sr, Ti a V; u Rb a As chybí pro srovnání data (tab. 2, obr. 4). Oxid sodný a hořečnatý nebyly detekovány vlivem omezení zvolené metody, které jsou dány nízkými energiemi elektronů sodíku a hořčíku, nízkým obsahem prvku ve vzorku a konstrukcí přístroje.

5. DISKUSE

Složení pseudofulguritů je závislé na složení terčové horniny, síle a trvání elektrického výboje. Studované sklo ze Žatčan má silně variabilní složení a obsahem SiO_2 (pod cca 90 hm. %) se odlišuje od (pseudo)fulguritů vzniklých z křemičitých hornin. Zjištěné rozdíly ve složení pseudofulguritu a výchozí horninou nejsou natolik zásadní (obr. 5), aby z ní bylo možné vyvozovat závěry o migraci prvků z okolí do taveniny, či naopak. S velkou pravděpodobností se jedná o odraz chemické i zrnitostní heterogenity výchozího sedimentu.

Studovaný materiál je typickým produktem kontaktu elektrického výboje s nezpevněnou horninou. Bylo provedeno srovnání s fulguritem z Bedřichova (Hrazdil *et al.* 2002), pseudofulgurity z Křenic (Kratochvíl 1957) a pseudofulguritu z Kaltenbachu v Rakousku (Brandstäter *et al.* 2009). Poslední dva vznikly úderem blesku do elektrického stožáru, příp. následným pádem drátů pod vysokým napětím.

Fulgurit z Bedřichova má silně variabilní chemické složení. Vykazuje srovnatelné a převážně vyšší obsahy SiO_2 (~62–80 hm. %), Al_2O_3 (~10–19 hm. %) a FeO (~1–8 hm. %) se vzorky ze Žatčan. Vyšší je obsah BaO (~ 0,13–0,24 hm. %), zřetelně nižší je obsah CaO (~ 0,21–1 hm. %) a MgO (~ 0,86–1,38 hm. %), poměr K_2O/Na_2O 3,5–2,31. Kusový ani kapkovitý fulgurit se neliší (Hrazdil *et al.* 2002).

Pseudofulgurit z Křenic je bohatší SiO_2 (74 hm. %), chudší Al_2O_3 (12,68 hm. %), Fe (2,74 hm. % FeO a 1,50 hm. % Fe_2O_3), MgO (1,04 hm. %) a CaO (2,55 hm. %). Poměr alkálií K_2O/Na_2O je 2,57. Obsahuje také Cu z roztavených drátů, která mu lokálně dává také oranžově červené zbarvení (Kratochvíl 1957). Uvedená analýza byla zhotovena klasickou metodikou na mokré cestě, stanovený obsah trojmocného železa nemusí proto nutně pocházet ze skelné matrix.

U pseudofulguritu z Kaltenbachu byly publikovány dva typy skla (Brandstäter *et al.* 2009). Žlutozelené průsvitné sklo vykazuje oproti sklům ze Žatčan shodný obsah SiO_2, vyšší obsah Al_2O_3, menší obsah FeO, MgO a CaO a poměr K_2O/Na_2O = 3,65, černé opakní sklo má pak nižší obsah SiO_2 (jen 53,1 hm. %) vysoký podíl Ti (2,06 hm. % TiO_2) a srovnatelný obsah FeO (11,3 hm. % FeO), nízký je obsah Ca a Mg; kolísavý podíl alkálií, K_2O/Na_2O = 3,26 (tab. 1). Jako akcesorické minerály byl identifikován spinel, Cr-spinel, amfibol, zirkon, baddeleyit, osumilit, mullit a globule o složení Fe-P (± Ni) a vzácně Fe-Si (±Cr, ±Ni). Teplota vzniku pseudofulguritu se pohybovala nad 1677 °C v extrémně redukčním prostředí (Tropper a Braunhofer 2011).

Složení pseudofulguritu ze Žatčan u Brna se odlišuje od výše uvedených patrně hlavně v důsledku jiného složení terčové horniny.

6. ZÁVĚR

Pseudofulgurit v Žatčanech u Brna vznikl při pádu drátů pod vysokým napětím (22 kV) v několika přerušovaných místech, kde se dotknuly země (částečně antropogenní hlinito-písčitý sediment se štěrkovou příměsí), prokazatelně bez účinku blesku. Vznikly rozvětvené, trubičkovité i nepravidelné agregáty o maximální velikosti 10 cm, podobně jako je tomu u některých fulguritů. Sklo je tmavé barvy, s četnými bublinami řádově mm velikosti, u trubičkovitých tvarů s centrálním zaobleným i hranatým kanálkem. Pseudofulgurit tvoří několik druhů skla, včetně vzácnějšího lechatelieritu, které obsahuje jen sporadické kuličky kovů submikroskopické velikosti, složené z Fe, příp. s podílem P, Ni, Si, Co a Cr, dokládající silně redukční prostředí. Spíše vzácné jsou i krystalické (novotvořené?) fáze o složení Ca-Fe-Al-Si (±Ti). Lokálně, zvláště při okrajích, lze pozorovat reliktní křemen a velmi sporadicky biotit. Ke sklu jsou na okrajích přitaveny i hrubší klasty hornin. Nižší poměr K_2O/Na_2O 2,53–0,13 a relativně vysoké zastoupení silně volatilní síry může dokládat také relativně nižší teplotu tavení.

Autoři publikace uvítají možnost získat od nálezců přesně lokalizované fulgurity (z pouští nebo plážových písků, příp. z vrcholků skalních útesů) a pseudofulgurity jak z našeho území, tak i ze zahraničí, příp. i fotografie konkrétních míst nálezů. V muzejních sbírkách v České republice je tohoto pozoruhodného studijního materiálu relativně málo. Zejména pseudofulgurity, vznikající v místech pádu drátů pod vysokým napětím, patrně nebudou vzácností. Nelze je pochopitelně odebírat v době, pokud jsou tyto dráty pod elektrickým proudem!

7. PODĚKOVÁNÍ

Odborný článek vznikl na základě institucionální podpory dlouhodobého koncepčního rozvoje výzkumné organizace poskytované Ministerstvem kultury (DKRVO, MK000094862). Děkujeme též J. Cágovi za zhotovené fotografií pseudofulguritu a J. Lounovi za překlad abstraktu.

LITERATURA

Bellucci, J. J., Simonetti, A., Koeman, E. C., Wallace, Ch., Burns P. C., 2014: A detailed geochemical investigation of post-nuclear detonation trinitite glass at high spatial resolution: Delineating anthropogenic vs. natural components. – Chemical Geology, 365, 69–86.

Bouška, V., Konta, J., 1986: Moldavites – Vltavíny. – Acta Universitatis Carolinae, Geologica, Universita Karlova, Praha, 127.

Bouška, V., Borovec, Z., Cimbálníková, A., Kraus, I., Lajčaková, A., Pačesová, M., 1987: Přírodní skla. – Academia Praha, 264.

Brandstätter, F., Seemann, R., Hammer, V. M. F., Berger, A., Koller, F., Stehlik, H., 2009: Über den Fund eines ungewöhnlichen „Fulgurit"-Objekts bei Kaltenbach, Gemeinde Vitis, Niederösterreich, Österreich. – Annalen Naturhistorisches Museum. Wien, 110 A, 1–16.

Cílek, V., 1997: Fullereny i na Pravčické bráně? O různých stopách po úderu blesku. – Vesmír, 76, 628–629.
Crespo, T. M., Lozano Fernandez, R. P., Laguna R. G., 2009: The fulgurite of Torre de Moncorvo (Portugal): description and analysis of the glass. – European Journal of Mineralogy, 21, 4, 783–794.
Čirvinskij, P. N., 1922: O fulguritech. – Rozpravy České akademie věd a umění, tř. 2, 31, 1–15.
Eby, G. N., Charnley, N., Pirrie, D., Hermes, R., Smoliga, J., Rollinson G., 2015: Trinitite redux: Mineralogy and petrology. - American Mineralogist, 100, 2-3, 427–441.
Elmi, Ch., Chen, J., Goldsby, D., Gieré, R. 2017: Mineralogical and compositional features of rock fulgurites: A record of lightning effects on granite. – American Mineralogist, 102, 7, 1470–1481.
Fickert, L., Pasker, J., 2013: Mineralogie und Petrologie experimentell erzeugter Pseudofulgurite. – Mitteilungen der Österreichischen Mineralogischen Gesellschaft, 159, 145–145.
Feldman, V., 1988: Comparative characteristics of impactite, tektite and fulgurite glass. – Procedings 2nd International Conference on Natural glasses, Prague, 215–220.
Friedman, I., Long, W., 1984: Volcanic glasses, their origins and alteration processes. – Journal of Non-Crystalline Solids, 67, 127–133
Grapes, R., 2010: Pyrometamorphism. – 2nd Edition, Springer, Berlin Heidelberg, 365.
Gieré, R., Wimmenauer, W., Müller-Sigmund, H., Wirth, R., Lumpkin, G. R., Smith, K. L., 2015: Letter. Lightning-induced shock lamellae in quartz. – American Mineralogist, 100, 7, 1645–1648.
Hrazdil, V., Houzar, S., Skála, R., 2002: Charakteristika fulguritu z Bedřichova. – Sborník „Mineralogie Českého masivu a Západních Karpat 2002“, Olomouc, 37–40.
Kassi, A. M., Kasi, A. K., Friis H., Kakar, D. M., 2013: Occurrences of rock-fulgurites associated with steel pylons of the overhead electric transmission line at Tor Zawar, Ziarat District and Jang Tor Ghar, Muslim Bagh, Pakistan. – Turkish Journal of Earth Sciences, 22, 1010–1019.
Konta, J., Saul, J. M., 1976: Moldavites and survey of other naturally occurring glasses. – Journal of Gemmology, 15, 4, 179–204.
Kratochvíl, F., 1957: Fulgurit z Křenice u Uhříněvsi. – Sborník k osmdesátinám akademika Františka Slavíka, 197–202.
McCloy, J. S., 2019: Frontiers in natural and un-natural glasses: An interdisciplinary dialogueand review. – Journal of Non-crystalline Solids X, 4, 100035, https://doi.org/10.1016/j.nocx.2019.100035
MacDonald, F. A., Mitchell K., Cina, S. E., 2004: Evidence for a Lightning-stroke origin of the Edeowie glass. – Lunar and Planetary science, 35, 1406.
Nováček, R., 1940: Fulgurity – cesty blesků. – Naší přírodou, 3, sešit 22, 874–877.
Nováček, R., 1941: A ještě fulgurity. – Naší přírodou, 4, sešit 5, 193–194.
O'Keefe, J. A., 1984: Natural glass. In: Pye, L. D., O'Keefe, J. A., Fréchette, V. H. (eds.): Natural glasses, 1–17. North-Holland, Amsterdam, 662.
Pasek, M. A., Pasek, V. D., 2017: The forensics of fulgurite formation. – Mineralogy Petrology, 112, 185–198.
Pasek, M. A., Block, K., Pasek, V., 2012: Fulgurite morphology: a classification scheme and clues to formation. – Contribution Mineralogy Petrology, 164, 477–492.
Pouchou, J. L., Pichoir, F., 1985: „PAP“ procedure for improved quantitative microanalysis. – Microbeam Analysis, 20, 104–105.
Preuss, E., Masch, I., Erismann, T. H., 1988: Frictionite: glasses quenched from friction-generated melts in two big landslide events. – Procedings 2nd International Conference on Natural glasses, Prague, 399–400.
Roberts, S. E., Sheffer, A. A., McCanta, M. C., Dyar, M. D., Sklute, E. C., 2019: Oxidation state of iron in fulgurites and Trinitite: Implications for redox changes during abrupt high-temperature and pressure events. – Geochimica et Cosmochimica Acta, 266, 332–350
Rost, R., 1963: Fulgurity – výtvory blesku. – Vesmír, 43, 278.
Tropper, P., Braunhofer, D., 2011: Petrologie und Geothermometrie des Pseudofulgurits von Kaltenbach (Gemeinde Vitis, Niederösterreich). – Joint Meeting of the DGK, DMG and ÖMG, Salzburg, Austria, September 20–24, 2011; Abstracts Volume, P12-P06, 109.
Veiga, N., Martín-Gil, F. J., Martín-Gil J., Gomes, E., Martín-Ramos, P., 2021: Physico-chemical study of an exogenic fulgurite from a thunderstorm on 10th August 2013 in Dallas, TX. – Physics and Chemistry of Minerals, 48, 3, 12.
Zemann, J., (1988): What is glass?. – Procedings 2nd International Conference on Natural glasses, Prague, 35–40.

INTERNETOVÉ ZDROJE

https://www.etf.cuni.cz/~moravec/fotky/fulgur.html (přístup. 3. 7. 2021; J. Moravec: Skály tetované bleskem. – Outdoor 4/2003)