Identifikace maarové diatrémy v Pytlácké jámě v Jizerských horách pomocí integrovaných geofyzikálních metod

Identification of the maar diatreme in the Pytlácká jáma hollow in the Jizerské hory Mts using integrated geophysical methods

Ivan ROUS¹⁾, Martin DOSTALÍK²⁾, Václav FAIT³⁾, Martin PUFFR⁴⁾, Jakub ŠTAINBRUCH⁵⁾, Ondřej ŠVAGERA⁶⁾, Josef KLOMÍNSKÝ⁷⁾ & Vojtěch BENEŠ⁸⁾

 ¹⁾ Severočeské muzeum v Liberci, Masarykova 11, CZ-460 01 Liberec 1; e-mail: ivan.rous@muzeumlb.cz
^{2, 6, 7)} Česká geologická služba, Klárov 131/3, CZ-118 21 Praha 1;
²⁾ e-mail: martin.dostalik@geology.cz; ⁶⁾ e-mail: ondrej.svagera@geology.cz;
⁷⁾ e-mail: josef.klominsky@geology.cz)
^{3, 5)} Inset s. r. o., Lucemburská 1170/7, CZ-130 00 Praha 3;
³⁾ e-mail: fait.vaclav@inset.com; ⁵⁾ e-mail: stainbruch.jakub@inset.com
⁴⁾ MapFactor s. r. o., Štefánikova 24, CZ-150 00 Praha 5; e-mail: puffr@mapfactor.cz
⁸⁾ G-Impuls Praha s. r. o., Přístavní 24, CZ-170 00 Praha 7; e-mail: benes@gimpuls.cz

Abstract. The Pytlácká jáma hollow is an oval natural depression 1000×600 m in size and about 40 m deep. So far it has been presented as an example of the sole glacial cirque in the Jizerské hory Mts. New integrated geophysical survey brought evidence for volcanic origin of the Pytlácká jáma, representing a maar diatreme. Such volcanic structures are considered to be the sources of precious stones – sapphires and rubies in their pyroclastic deposits in Australia, Africa and Southeast Asia. For that reason the identification of the Pytlácká jáma hollow as a maar diatreme can help to answer the key issue.

ÚVOD

V širším okolí osady Jizerka byla provedena v letech 2017 a 2018 rekognoskace tří terénních prohlubní v povodí řeky Jizery, a to Hojerovy, Pytlácké a Celní jámy (Obr. 1 a 2). Po předběžném vyhodnocení se největší pozornost geologů soustředila k Pytlácké jámě. Dominantní deprese oválného tvaru o rozměrech 1 000 × 600 m a hloubce okolo 40 m byla dosud uváděna za příklad jediného ledovcového karu v Jizerských horách (Engel et al. 2017). Podle Barra a Spagnola (2015) vznikají za specifických klimatických podmínek kruhovité deprese z různých pre-existujících prohlubní. Ke zvětšení těchto depresí může dojít ledovcovou erozí, nivačními procesy, skalním zřícením, hloubkovým chemickým větráním a rozpouštěním karbonátů nebo kolapsem vulkanických kráterů. Engel et al. (2017) předpokládají, že podle charakteru podloží studovaného území je vznik Pytlácké jámy spojený s ledovcovou erozí, nivací nebo chemickým větráním. Tito autoři shromáždili geomorfologické a sedimentologické důkazy, že Pytlácká jáma byla pravděpodobně vytvořena kruhovitým ledovcem o maximální vrstvě ledu 45 až 55 m. Na podporu těchto závěrů Engel et al. (2017) provedli sondáž v rašeliništní a štěrko-pískovité výplni kráteru do hloubky 4,6 m a dva profily elektrické odporové tomografie (ERT Electric Resistivity Tomography) napříč Pytláckou jámou ve směru JZ–SV (Obr. 3). Jejich hlavní profil ERT napříč Pytláckou jámou ukazuje na přítomnost elektricky vodivé sedimentární výplně (Obr. 4). Centrum Pytlácké jámy je pokryto různě mocnou vrstvou rašeliny v rozmezí asi 0,5 až 2,5 m. V jejím podloží byly až do hloubky 4,5 m navrtány ostrohranné štěrkopísky splachových sedimentů pocházejících z okolního jizerského granitu. Holocenní stáří rašelinného pokryvu z hloubky 190 cm bylo stanoveno metodou ¹⁴C na 11,42 tis. \pm 129 let BP (Engel et al. 2017).

Geomorfologie Pytlácké jámy

Arbitrárně zvolený okraj Pytlácké jámy (Obr. 5) má tvar pánve sevřené mezi dvěma okrajovými zlomy severozápadního směru. Její délka je cca 1 000 m a šířka přes 600 m s maximálním rozdílem výšky cca 40 m. Horizontální plocha cca 0,44 km² reprezentuje povrchový rozsah reziduální části předpokládané vulkanické diatrémy Pytlácké jámy.

Za účelem zjištění původního rozsahu a předpokládaného objemu současné deprese a jejího zarovnání s paleopovrchem byl zkonstruován trojrozměrný model vycházející z digitálního modelu reliéfu páté generace (DMR 5G, ČÚZK). Předpokládaná horní hranice paleopovrchu kráterové části maarové diatrémy byla stanovena na západní straně Pytlácké jámy, na úpatí svahu Pytláckých kamenů tvořeném granity jizerského masivu. Pomocí lineární triangulace byla vytvořena trojúhelníková síť (mesh) představující předpokládaný paleopovrch. Mezi touto sítí a současným povrchem Pytlácké jámy získaným z dat DMR 5G byl vypočten objemový model, který představuje předpokládané množství povrchovou erozí odstraněného materiálu. Odhad degradované (erodované) části maarové diatrémy Pytlácké jámy se pohybuje v řádu dvou milionů m³.

Geologické prostředí Pytlácké jámy

Pytlácká jáma se nachází při sy. okraji západní části krkonošsko-jizerského kompozitního masivu v prostředí porfyrického, středně zrnitého biotitického granitu jizerského typu (Obr. 6). Tento granit svrchnokarbonského stáří 319,5 milionů let (Žák et al. 2013) se vyznačuje často lineární až planární orientací vyrostlic draselných živců a častými mikrogranulárními enklávami a biotitickými šlírami. Základní hmota jizerského granitu se skládá z plagioklasu, K-živce, biotitu, nehojného amfibolu a akcesorických minerálů (apatitu, allanitu, zirkonu a ilmenitu). Výrazné (až 3-5 cm velké) vyrostlice narůžovělého K-živce jsou často lemované bílým plagioklasem (Klomínský 2018). Základní síť tektonické segmentace jizerského granitu tvoří zlomy sudetského (SZ-JV) směru a krušnohorského (SV-JZ) směru (Klomínský 2018). Hustota těchto zlomů má hierarchické uspořádání od jednotlivých puklin v masivním čerstvém granitu až po jejich roje různé hustoty v hydrotermálně přeměněném granitu slévající se do tektonických zón často mnohametrových mocností. Struktury sudetského směru jsou vesměs starší a mají charakter dilatačních zlomů s velmi pestrou výplní. V takovém prostředí se často vyskytují permokarbonské žíly bazaltů až bazaltických andezitů (tzv. melafyrů) až několikametrových mocností. Při opakování seizmických pohybů na těchto zlomech byly melafyry patrně v mezozoiku přeměněny na tektonické brekcie a stmeleny několika generacemi křemene, často s hematitem. Takové zlomy později sloužily jako přívodní dráhy kenozoických vulkanitů. V území Jizerských luk jsou tyto tektonické struktury zastoupeny jednak dominantním zlomem probíhajícím údolím Jizerky k úpatí vrchu Bukovce a jednak harrachovským zlomem sledujícím tok Jizery a svahy Pytláckých kamenů.

Regionální geofyzikální pole Pytlácké jámy

Plošné gravimetrické pozemní mapování v měřítku 1 : 25 000 (Šrámek et al. 2002; Sedlák et al. 2003) bylo realizováno na ploše západní části krkonošsko-jizerského masivu se značným překryvem i na polské státní území (Obr. 7). Na území Velké a Malé Jizerské louky existuje několik kruhových negativních reziduálních anomálií regionálního tíhového pole, zejména v prostoru Pytlácké jámy a v horním toku Jizery již na polském území (Obr. 7). V letech 2004–2005 bylo v severních Čechách provedeno letecké magnetometrické a gamaspektrometrické mapování (obsahy uranu, thoria, draslíku a cesia) v měřítku 1 : 50 000 pokrývající také celou západní část krkonošsko-jizerského masivu (Dědáček et al. 2005). Ve výsledných magnetometrických mapách území Velké a Malé Jizerské louky jsou znázorněny dominantní pozitivní a negativní anomálie magnetického pole, zejména v prostoru Pytlácké jámy a vrchu Bukovce (Obr. 8 a 9).

METODIKA

Existující geofyzikální a morfologická data byla doplněna o nová geofyzikální měření. Detailní pozemní měření magnetického, tíhového i geoelektrického pole Pytlácké jámy bylo provedeno na stejném profilu, aby bylo možné jejich pozdější vzájemné porovnání (Obr. 3). Uvedený profil ve směru JZ–SV podél lesního průseku vede napříč Pytláckou jámou.

Magnetometrie byla měřena na úseku o délce 950 m, gravimetrie na úseku dlouhém 600 m a ERT profil dosahoval délky 795 m. Vzájemná pozice ERT profilů A (Engel et al. 2017) a nového profilu B je zobrazena na obrázku 3. Další pozemní měření magnetického pole uvnitř deprese Pytlácké jámy bylo provedeno detailně v síti devíti nepravidelně probíhajících profilů obsahující celkem 600 měřených bodů s cílem lokalizace centra negativní isometrické magnetické anomálie (Obr. 10). Pro pozemní měření totálního vektoru magnetického pole (nT) na území Pytlácké jámy byl použit protonový magnetometr SatisGeo PMG-2 se sondou 2 m nad zemí a s ručním zápisem hodnot do přístroje GPS ve formátu waypointů s exportem do formátů GPX, CSV a KML/KMZ. Měření, provedené v letech 2017 a 2018, bylo zaměřeno na vyhledávání vulkanických těles, resp. magnetických anomálií s přesností zápisu 1 nT. Celkem bylo změřeno asi 1 400 bodů v lokalitě, z čehož 600 jich spadá do prostoru Pytlácké jámy. Vzdálenost bodů na profilu se pohybovala od 5 do 20 m podle situace v terénu a velikosti změný magnetického pole. Kontrola denních magnetických variací byla realizována pomocí opakovaných měření na opěrném bodě. Pomocí opěrných bodů byl zjištěn posun 30 nT mezi oběma etapami měření. Druhá etapa byla opravena o tento rozdíl při závěrečné grafické interpretaci. Izolinie totálního vektoru magnetického pole (T) byly generovány programem SURFER 13 od firmy Golden Software metodou Kriging v gridu 10 × 10 m.

Pozemní gravimetrické měření bylo provedeno přístrojem CG3M od firmy Scintrex s přesností opakovatelnosti 0,005 mGal. Vzdálenost měřených bodů byla vzhledem k velikosti zájmového území stanovena na 50 m, celkem tedy bylo změřeno 13 bodů s délkou profilu 600 m (Obr. 3). Doba měření na jednom bodě byla 120 sekund s minimálně jedním opakováním na každém bodě. Nedílnou součástí bylo i relativní zjištění nadmořských výšek jednotlivých měřených bodů pomocí nivelačního přístroje Sokkia.

V etapě terénních prací bylo provedeno multielektrodové odporové profilování (ERT) a magnetometrické měření po stejné linii jako gravimetrické měření (Obr. 3). K měření ERT byla použita aparatura ARES od firmy GF Instruments s. r. o. Vzdálenost elektrod, a tedy krok měření, byla 5 m. Celkem bylo měřeno na osm současně zapojených sekcí po osmi elektrodách, které se během měření postupně přesouvaly z nižších metráží do vyšších (tzv. rolovaný profil). Minimální měřená vzdálenost proudových elektrod ABmin byla 15 m a maximální vzdálenost ABmax byla 315 m. Celková délka profilu byla 795 m (Obr. 3).

VÝSLEDKY

Magnetometrický obraz Pytlácké jámy

Magnetické pole Pytlácké jámy je v aeromagnetické mapě (Dědáček et al. 2005) reprezentováno negativní anomálií kruhového tvaru s koncentricky uspořádanými izoliniemi o celkové amplitudě –40 nT uprostřed uvedené deprese (Obr. 9). Výsledky nového magnetometrického měření (Obr. 10) korelují s pozicí publikované záporné tíhové anomálie (Obr. 4). Pozemní plošné magnetometrické měření lokalizovalo epicentrum záporné magnetické anomálie v hodnotě –280 nT. Anomálie má rozměry cca 200 × 250 m a mohla by reprezentovat reverzně magnetizované těleso válcovitého tvaru, subvertikálně uložené v neznámé hloubce v centru předpokládané vulkanické diatrémy. Protože relativně vodivá sedimentární výplň Pytlácké jámy byla dosud ověřena jen do hloubky ca 70 m, pak hypotetické vulkanické těleso s obsahem feromagnetických minerálů se nachází ve větší hloubce.

Charakter negativní magnetické anomálie Pytlácké jámy je velice podobný reverzní magnetické anomálii vulkanického tělesa olivinického nefelinitu na blízkém vrchu Bukovci (Obr. 8).

Gravimetrický obraz Pytlácké jámy

Podle gravimetrické mapy 1:50 000 (Šrámek et al. 2002) se území Pytlácké jámy nachází uvnitř regionální negativní gravimetrické anomálie o velikosti –40 mGal (Obr. 7). Centrum této anomálie bylo potvrzeno uvnitř Pytlácké jámy pozemním měřením (Fait 2018) podél profilu C – gravimetrie (Obr. 3). Z něho je patrné, že centrum Pytlácké jámy obsahuje horniny s nižšími hustotami reprezentované také negativní tíhovou anomálii (více než –2 mGal), která dosahuje nejnižší hodnoty na metráži 400 profilu C (Obr. 3 a 11).

Geoelektrická tomografie Pytlácké jámy

Vysoké odpory reprezentují v profilu B výskyt málo porušené horniny (Obr. 4). Polohy granitů byly profilovým měřením zachyceny při okrajích profilu v intervalu staničení 0–150 m a 650–800 m. Dále se blok relativně kompaktní horniny s odpory přes 5 000 ohm.m projevil v intervalu st. 360–580 m v hloubce od 30–40 m pod úrovní terénu. Z odporových měření nelze určit, zda se jedná o projev granitu nebo vulkanitu.

Nízké odpory vykazují jednak polohy zvodnělých sedimentů, jednak zvodnělá, hlouběji založená poruchová pásma. Na zvýšené vodivosti prostředí (místy i pod 40 ohm.m) se může podílet několik faktorů – vyšší mineralizace vody, přítomnost huminových kyselin, eventuálně vyšší výskyt jílových minerálů vzniklých intenzivním zvětráváním hydrotermálně přeměněných hornin podél poruchových zón.

V odporovém profilu se projevila do hloubky 20–40 m od povrchu poloha zvodnělých kvarterních uloženin prakticky v celé délce profilu (Obr. 4). Jedná se o rašelinný pokryv v centrální partii Pytlácké jámy a především o vrstvu zvodnělých štěrkopísků. Těleso předpokládané diatrémy se projevilo jako hlouběji založená vodivá zóna, detekovaná ve střední části profilu. Okraje detekované struktury jsou strmě ukloněné a poměrně ostře ohraničené (Obr. 4). Z výsledků plošné magnetometrie vyplývá, že střed eliptické struktury diatrémy se nachází jihovýchodně od ERT profilu a odporovým měřením byl tedy zachycen jen okraj studované struktury. Spodní ohraničení detekované vodivé výplně diatrémy přesahuje hloubkový dosah měření (tj. 70 m od povrchu terénu) a nebylo tedy ověřené.

Model maarové diatrémy Pytlácké jámy

Pro budoucí prezentaci problematiky populárně-naučnou formou byl vytvořen na základě dostupných údajů a obecných modelů (Lorenz 2003; Suhr et al. 2006) hypotetický model tělesa. Model maar-diatrémového vulkánu Pytlácké jámy má podobu oválného trychtýře orientovaného ve směru SZ–JV (Obr. 12) a skládá se z kráterového jezera, horní, spodní a kořenové zóny diatrémy s přívodní žílou vulkanitu bazaltového složení. Pro tvorbu modelu byla nastíněna následující hypotéza. Z experimentů modelujících vznik kráterového jezera podobných vulkánů se předpokládá, že v hloubce cca 200 m pod povrchem došlo k překonání litostatického tlaku nadloží vlivem interakce intrudujícího magmatu s podzemní vodou a tím k explozi vedoucí k destrukci jak nadložního granitu, tak i intrudujícího vulkanitu, doprovázené vyvržením této horninové drtě a prachu do volného prostoru nad zemský povrch. Kolem vzniklého výbuchového kráteru vznikl charakteristický prstenec tvořený vulkanickým popelem. V nitru maarového vulkánu, vlivem do hloubky směřující migrace epicenter termohydraulických explozí, rostla spodní zóna diatrémy. Rozšiřovala se i aureola okolního granitu charakterizovaná slabě redukovanou hustotou a nově vytvořenými puklinami a mikrotrhlinami.

V dalším geologickém vývoji po kompletní erozi maarového kráteru o šířce přes 1 km a horní zóny diatrémy byla poeruptivní morfologie Pytlácké jámy modelována dlouhotrvající subsidencí způsobenou kompakcí výplně zbylé spodní zóny diatrémy vlivem její diagenetické alterace a poklesu pórovitosti. Nepřímo o tom svědčí její snížená hustota doložená detekcí výrazné negativní gravimetrické anomálie, jejíž centrum se nachází v centru Pytlácké jámy. Ta si i přes stále trvající zanášení jezerními, svahovými a rašelinnými sedimenty zachovala až do dnešní doby tvar mírné deprese.

Geneze maarové diatrémy Pytlácké jámy

Pytlácká jáma může patřit mezi tzv. freatomagmatické vulkány vznikající interakcí mezi magmatem a vodou (Kurszlaukis & Fulop 2013). Jejich eruptivní aktivita obvykle trvá jen několik dní až týdnů. Avšak krátký život těchto vulkánů vždy neznamená, že jejich struktura a dynamika je jednoduchá. Podle modelů maarových diatrém (Lorenz 2003; Suhr et al. 2006) Pytlácká jáma vznikla explozivní interakcí z velké hloubky proniklého žhavého vulkanického magmatu bazaltového složení s reservoárem podzemní vody. To vedlo blízko povrchu k výbuchu, kdy do atmosféry bylo vrženo mračno klastů okolního granitu i vulkanického materiálu (Obr. 11). Tyto vulkanity podobného složení jako bazanit z blízkého vrchu Bukovce pravděpodobně obsahovaly také úlomky matečných hornin dosud neznámého složení bohaté na drahé kameny. Tak se mohly tyto drahokamy reprezentované především safírem snadno dostat vzdušnou cestou do blízkého okolí. V místě Pytlácké jámy vznikl před několika desítkami milionů let hluboký výbuchový kráter, neboli maar, a pod ním diatréma ve tvaru trychtýře vyplněná úlomky okolního jizerského granitu s xenolity vulkanických hornin a průniky žil nebo tělesy bazických vulkanitů. Stěhování podzemních výbuchů směrem do hloubky

způsobilo silnou destrukci a hydrotermální alteraci jizerského granitu vedoucí k dlouhodobé subsidenci diatrémové výplně a tím i k postupnému zaplňování kráteru (maaru) splachovými a glacifluviálními sedimenty z jeho okolí (Obr. 13). Dnes se však Pytlácká jáma stále projevuje jako výrazná morfologická deprese. Jak uvádí Pilous (2006), existuje v okolí Pytlácké jámy dalších sedm nivačních depresí různé velikosti (Jizerská, Smědavská, Celní, Hojerova, Vlašská, Brusičská a Zálecká jáma), které si vyžadují obdobný geologický a geofyzikální průzkum k identifikaci jejich primárního původu. Že Pytlácká jáma není v Jizerských horách ojedinělou vulkanickou diatrémou svědčí obdobná maarová struktura v Rychnově u Jablonce nad Nisou (Skácelová et al. 2010) a maarové vulkány u Görlitz v Německu (Lorenz 2003).

ZÁVĚR

Novým průzkumem (pomocí geofyzikálního magnetometrického mapování a gravimetrického a elektromagnetického profilování) bylo zjištěno, že Pytlácká jáma má řadu vlastností geologické struktury vulkanického původu označované geology jako maarová diatréma. Takovým vulkanickým strukturám se připisuje původ drahých kamenů – safíru a rubínu na nalezištích v Austrálii, Africe a jihovýchodní Asii (Sutherland et al. 2015). Geofyzikální měření provedené v letech 2017 a 2018 na lokalitě Pytlácká jáma je prvním krokem k novému celkovému zhodnocení území s důrazem na potvrzení existence vulkanických a neovulkanických těles v této oblasti krkonošsko-jizerského granitového masivu.

Poděkování. Geologický a geofyzikální výzkum Pytlácké jámy byl realizován v rámci projektu Severočeského muzea v Liberci "Jizerka 2018–2019" a interního projektu České geologické služby č. 322800. Poděkování patří Správě CHKO Jizerské hory, firmám Inset s. r. o., MapFactor s. r. o., Miligal s. r. o. a také odboru geologie Ministerstva životního prostředí, který podporuje implementaci geofyzikálních metod do struktury ČGS.

LITERATURA

- BARR I. D. & SPAGNOLO M. 2015: Glacial Cirques as Palaeoenvironmental Indicators: their Potential and Pimitations. *Earth-Science Reviews* 151: 48–78.
- DĚDÁČEK K., GNOJEK I., SEDLÁK J. & ZABADAL S. 2005: *Letecké geofyzikální mapování radioaktivních zátěží Liberecka*. Unpublished manuscript. Deposited in: Česká geologická služba, Praha.
- ENGEL Z., KŘÍŽEK M., KASPRZAK M., TRACZYK A., HLOŽEK M. & KRBCOVÁ K. 2017: Geomorphological and sedimentary evidence of probace glaciation in the Jizerské hory Mountains, Central Europe. *Geomorphology* **280**: 39–50.
- FAIT V. 2018: Výzkum vulkanických struktur pomocí geofyzikálních metod, lokalita Rybí loučky v Jizerských horách. Unpublished dissertation thesis. Deposited in: Přírodovědecká fakulta UK, Praha, 32 pp.
- KLOMÍNSKÝ J. 2018: The Krkonoše-Jizera Composite Massif never ending granite stories. Česká geologická služba, Praha, 145 pp.
- KURSZLAUKIS S. & A. FULOP A. 2013: Factors controlling the internal facies architecture of maar-diatreme volcanoes. Collection: Monogenetic Volcanism. *Bulletin of Volcanology* **75**(761), https://doi.org/10.1007/ s00445-013-0761-y.
- LORENZ V. 2003: Maar-Diatreme Volcanoes, their Formation, and their Setting in Hard rock or Soft-rock Environments. *Geolines* 15: 72–82.
- PILOUS V. 2006: Pleistocénní glacigenní a nivační modelace Jizerských hor. (The Pleistocene glacial and nivation landforms in the Jizerské hory Mountains). *Opera Corcontica* **43**: 21–44 (in Czech, English summary).
- SEDLÁK J., HANÁK J., MRLINA J., KREJČÍ Z. & MRÁZOVÁ Š. 2003: Gravimetrické mapování 1 : 25 000 v oblasti krkonošsko-jizerského krystalinika. Zpráva za roční výseč prací 2003. Unpublished manuscript. Deposited in: Česká geologická služba, Praha.

- SKÁCELOVÁ Z., RAPPRICH V., VALENTA J., HARTVICH F., ŠRÁMEK J., RADOŇ M., GAŽDOVÁ R., NOVÁKOVÁ L., KOLÍNSKÝ P. & PÉCSKAY Z. 2010: Geophysical research on structure of partly eroded maar volcanoes: Miocene Hnojnice and Oligocene Rychnov volcanoes (northern Czech Republic). Journal of Geosciences 55: 333–345.
- SUHR P., GOTH K., LORENZ V. & SUHR S. 2006: Long lasting subsidence and deformation in and above maardiatreme volcanoes – never ending story. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften 157: 491–511.
- SUTHERLAND F. L., COENRAADS R. R., ABDURIYIM A., MEFFRE A., HOSKIN P. W. O., GIULIANI G., BEATTIE R., WUHRER S. R. & SUTHERLAND G. B. 2015: Corundum (sapphire) and zircon relationships, Lava Plains gem fields, NE Australia: Integrated mineralogy, geochemistry, age determination, genesis and geographical typing. *Mineralogical Magazine* 79: 545–581.
- ŠRÁMEK J., SEDLÁK J., MRLINA J., HANÁK J., ONDRA P., MRÁZOVÁ Š. & KREJČÍ Z. 2002: Gravimetrické mapování 1 : 25 000 v oblasti krkonošsko-jizerského krystalinika. Unpublished manuscript. Deposited in: Česká geologická služba, Brno.
- VERNER K., MRÁZOVÁ Š., BŘÍZOVÁ E., BURIÁNEK D., HOLUB F., KLOMÍNSKÝ J., MALÍK J., MARTÍNEK K., PECINA V., RAMBOUSEK P., RUKAVIČKOVÁ L., SKÁCELOVÁ D., SKÁCELOVÁ Z., ŠTOR T., VRÁNA S. & ŽÁČKOVÁ E. 2013: *Vysvětlivky k Základní geologické mapě České republiky 1 : 25.000, list 03-142 Hejnice a 03-231 Jizerka*. Unpublished manuscript. Deposited in: Česká geologická služba, Praha, 143 pp.
- WHITE J. & ROSS P.-S. 2011: Maar-diatreme volcanoes: a review. Journal of Volcanology and Geothermal Research 201: 1–29.
- ŽÁK J., VERNER K., SLÁMA J., KACHLÍK V. & CHLUPÁČOVÁ M. 2013: Multistage magma emplacement and progressive strain accumulation in the shallow-level Krkonoše-Jizera plutonic komplex, Bohemian Massif. *Tectonics* 32: 1493–1512.



Obr. 1. Poloha Pytlácké jámy v Jizerských horách. Fig. 1. Location of the Pytlácká jáma hollow in the Jizerské hory Mts.



Obr. 2. Letecký pohled od SV na prohlubeň Pytlácké jámy pod Pytláckými kameny s pozadím vrchu Bukovce a Malé Jizerské louky. Foto A. Tauchman, 2012. Fig. 2. Aerial view of the Pytlácká jáma hollow with the Bukovec hill and Malá Jizerská louka (Little Jizera Meadow)

Fig. 2. Aerial view of the Pytlácká jáma hollow with the Bukovec hill and Malá Jizerská louka (Little Jizera Meadow) in the background. Photo by A. Tauchman, 2012.



Obr. 3. Pozice ERT profilů napříč Pytláckou jámou. Profil A – Engel et al. (2017), profil B – nové ERT měření, profil C – gravimetrické měření (Fait 2018).

Fig. 3. The position of ERT profiles across Pytlácká jáma. Profile A – Engel et. al. (2017), profile B – new ERT measuring, profile C – gravimetric measuring (Fait 2018).



Obr. 4. ERT profily napříč Pytláckou jámou (viz Obr. 6). A – Engel et al. (2017), B – nové měření. Fig. 4. ERT profiles across Pytlácká jáma (see Fig. 6). Profile A – Engel et. al. (2017), profile B – new measuring.



Obr. 5. Sklonitost svahů na základě DMR 5G (ČÚZaK, Analýzy výškopisu). Fig. 5. Slope inclination based on DMR 5G (ČÚZaK, Altimetric data analyses).



	plutonický granit (PL) metamorfovaná rula (PL)	+ + + + +	středně zrnitý, výrazně porfyrický biotitický granit středně zrnitý, slabě porfyrický biotitický granit
Obr. 6. Geologická	mapa okolí Pytlácké jámy v	povodí Jizery. Uprav	reno podle Základní geologické mapy Česko
republiky 1 : 25 000,	listu Jizerka (Verner et al. 20	113), doplněno území 1	Polska s nerozlišeným plutonickým granitem

republiky 1 : 25 000, listu Jizerka (Verner et al. 2013), doplněno území Polska s nerozlišeným plutonickým granitem. Fig. 6. Geological map of the Pytlácká jáma surroundings in the Jizera river basin. Adjusted to the Basic Geological Map of the Czech Republic 1 : 25 000, Jizerka sheet (Verner et al. 2013), extended by the Polish territory with undifferentiated plutonic granite.



Obr. 7. Výřez gravimetrické mapy s reziduálními anomáliemi (mGal) Pytlácké jámy a Louky Oberförster na polském území (Šrámek et al. 2002).

Fig. 7. Cutout of a gravimetric map with residual anomalies (mGal) of the Pytlácká jáma and Oberförster Meadow in the Polish territory (Šrámek et al. 2002).



Obr. 8. Výřez letecké magnetometrické mapy území Jizerské louky s anomáliemi Bukovce a Pytlácké jámy (Dědáček et al. 2005).

Fig. 8. Cutout of an aerial magnetometric map of the Jizerská louka with anomalies of the Bukovec hill and Pytlácká jáma (Dědáček et al. 2005).



Obr. 9. Letecká magnetometrická mapa české části oblasti Velké Jizery se zápornou magnetickou anomálií v lokalitě Pytlácká jáma (tmavě zelená) a kladným polem severně od jámy u řeky Jizery (tmavě červená) (Dědáček et al. 2005). Fig. 9. Aerial magnetometric map of the Czech part of the Velká Jizera area with a negative magnetic anomaly at the Pytlácká jáma locality (dark green) and a positive field north of the hollow at the Jizera river (dark red) (Dědáček et. al. 2005).



Obr. 10. Izometrická negativní magnetická anomálie –280 nT v centru Pytlácké jámy vymezená na základě pozemního detailního magnetometrického měření o půdorysu cca 200 × 250 m.

Fig. 10. A negative isometric magnetic anomaly of -280 nT in the centre of Pytlácká jáma, determined based on a detailed magnetometric surface measuring of an area approx. 200×250 m in size.



Obr. 11. Gravimetrický profil napříč Pytláckou jámou podél linie C na Obr. 3 (Fait 2018). Fig. 11. A gravimetric profile across Pytlácká jáma alongside the C line shown in Fig. 3 (Fait 2018).



Obr. 12. Model struktury vulkanické maarové diatrémy Pytlácké jámy. A – erodovaná část maarové struktury, B – zachovalá část maarové struktury. Upraveno podle Lorenze (2003), Suhra et al. (2006), Whiteho & Rosse (2011). Fig. 12. A model of the structure of the Pytlácká jáma volcanic maar diatrema. A – the eroded part of the maar structure, B – the preserved part of the maar structure. Adapted from Lorenz (2003), Suhra et. al (2006), White & Ross (2011).



Obr. 13. Model vývoje vzniku maarové diatrémy podle Kurszlaukise & Fulopa (2013). Modrá linie značí hladinu podzemní vody.

Fig. 13. A model of the development of a maar diatreme according to Kurszlaukis & Fulop (2013). The blue line indicates the level of groundwater.