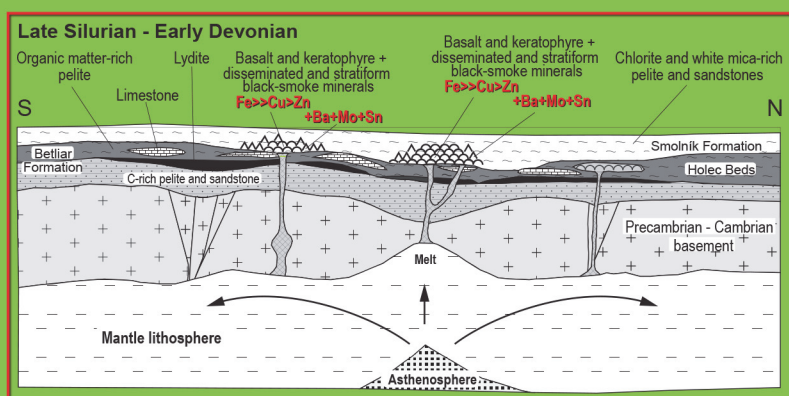
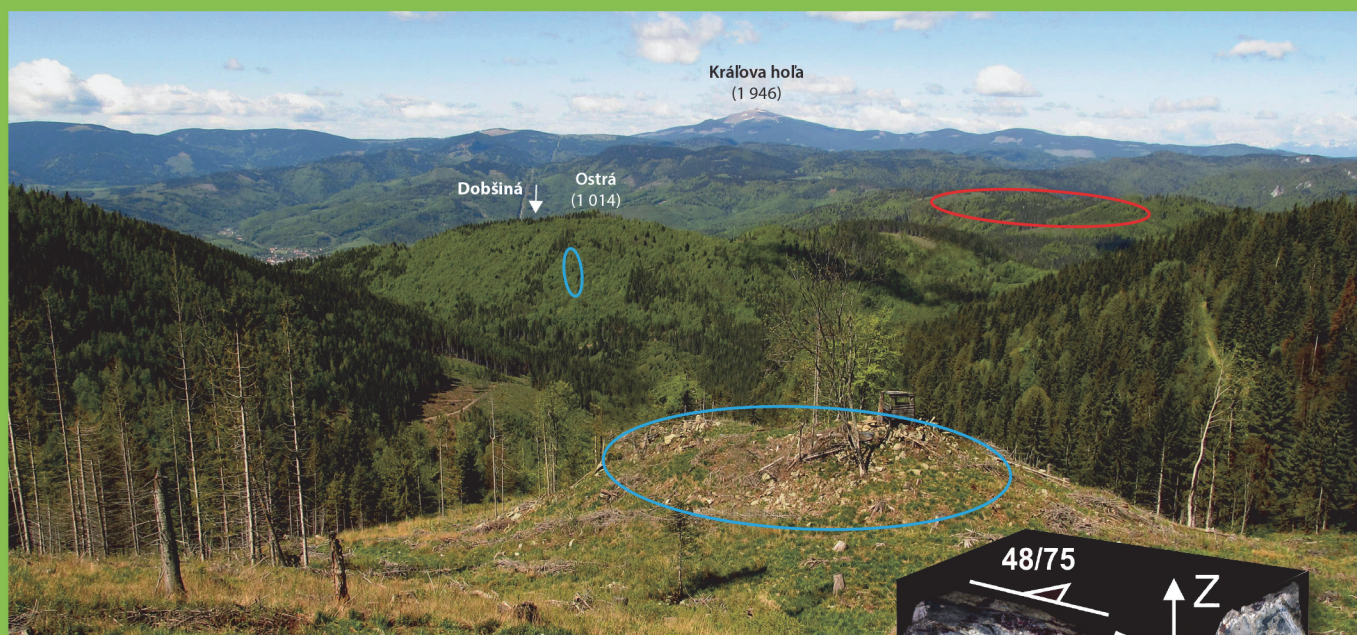


48/2/2016

ISSN 1338-3523

ISSN 0369-2086

Mineralia Slovaca



Štátny geologický ústav Dionýza Štúra Bratislava



Predseda vydavateľskej rady – Chairman of Editorial Board

BRANISLAV ŽEC

Štátny geologický ústav Dionýza Štúra Bratislava

Vedecký redaktor – Scientific Editor

ZOLTÁN NÉMETH

Štátny geologický ústav Dionýza Štúra
Regionálne centrum Košice
Jesenského 8, 040 01 Košice
zoltan.nemeth@geology.sk

REDAKČNÁ RADA – EDITORIAL BOARD

IGOR BROSKA, Ústav vied o Zemi SAV Bratislava

KLEMENT FORDINÁL, Štátny geologický ústav D. Štúra Bratislava

VLASTA JÁNOVÁ, Ministerstvo životného prostredia SR Bratislava

MARTIN KOVÁČIK, Štátny geologický ústav D. Štúra Bratislava

PETER MALÍK, Štátny geologický ústav D. Štúra Bratislava

JOZEF MICHALÍK, Ústav vied o Zemi SAV Bratislava

ĽUBOMÍR PETRO, Štátny geologický ústav D. Štúra Košice

DUŠAN PLAŠIENKA, Prírodovedecká fakulta UK Bratislava

MARIÁN PUTIŠ, Prírodovedecká fakulta UK Bratislava

IGOR SLANINKA, Štátny geologický ústav D. Štúra Bratislava

JÁN SOTÁK, Ústav vied o Zemi Banská Bystrica

LADISLAV ŠIMON, Štátny geologický ústav D. Štúra Bratislava

PAVEL UHER, Prírodovedecká fakulta UK Bratislava

REDAKCIA – EDITORIAL STAFF

Vedúci oddelenia vydavateľstva ŠGÚDŠ a propagácie – Head of the Department of ŠGÚDŠ Publishers and Promotion

LADISLAV MARTINSKÝ

ladislav.martinsky@geology.sk

Jazykoví redaktori – Lingual editors

Janka Hrtusová – Zoltán Németh

janka.hrtusova@geology.sk

Grafická úprava a technické spracovanie – DTP processing

Slávka Žideková

slavka.zidekova@geology.sk

Mineralia Slovaca (Web ISSN 1338-3523, ISSN 0369-2086), EV 3534/09, vychádza dvakrát ročne. Vydavateľ a tlač: Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, Mlynská dolina 1, 817 04 Bratislava, IČO 31 753 604. Dátum vydania čísla 48/2/2016: december 2016.

Predplatné v roku 2017 vrátane DPH, poštovného a balného pre jednotlivcov 16,50 €, pre členov SGS a geologických asociácií 15,40 €, pre organizácie v SR 22,00 €. Cena jednotlivého čísla je 5,50 € vrátane DPH. Časopis možno objednať v redakcii a v knižnici regionálneho centra v Košiciach.

Adresa redakcie: Štátny geologický ústav D. Štúra – RC Košice (Mineralia Slovaca), Jesenského 8, 040 01 Košice. Telefón: 055/625 00 43; fax: 055/625 00 44, e-mail: mineralia.slovaca@geology.sk, e-mail knižnica: secretary.ke@geology.sk

Mineralia Slovaca (Web ISSN 1338-3523, ISSN 0369-2086) is published twice a year by the State Geological Institute of Dionýz Štúr Bratislava, Slovak Republic. The date of issuing of the number 48/2/2016: December 2016.

Subscription for 2017 calendar year: 33.00 € (Europe), 45.00 (besides Europe), including VAT, postage and packing cost. Price of one number is 5.50 € including VAT. Claims for nonreceipt of any issue will be filled gratis.

Order send to address of the Editorial office: Štátny geologický ústav D. Štúra – RC Košice (Library), Jesenského 8, SK-04001 Košice, Slovak Republic. Phone: +421/55/625 00 43; fax: +421/55/625 00 44, e-mail: mineralia.slovaca@geology.sk, library: secretary.ke@geology.sk

© Štátny geologický ústav Dionýza Štúra Bratislava

PŮVODNÉ ČLÁNKY – ORIGINAL PAPERS

Németh, Z. & Putiš, M.

RNDr. Pavol Grecula, DrSc., geovedec európskeho formátu, oslávil osemdesiatku

RNDr. Pavol Grecula, DrSc., geoscientist of European format, has celebrated his eightieth birthday99

Radvanec, M. & Grecula, P.

Geotectonic and metallogenetic evolution of Gemicum (Inner Western Carpathians) from Ordovician to Jurassic

Geotektonický a metalogenetický vývoj gemerika od ordoviku po juru 105

Németh, Z., Putiš, M. & Hraško, L.

The relation of metallogeny to geodynamic processes - the natural prerequisite for the origin of mineral deposits of public importance (MDoPI): The case study in the Western Carpathians, Slovakia

Podmienenosť metalogenézy geodynamickými procesmi – primárna podmienka vzniku ložísk nerastov verejného významu (MDoPI): prípadová štúdia zo Západných Karpát 119

Putiš, M., Li, J., Ružička, P., Ling, X. & Nemec, O.

U/Pb SIMS zircon dating of a rhyolite intercalation in Permian siliciclastics as well as a rhyodacite dyke in micaschists (Infrataticum, W. Carpathians)

U/Pb SIMS datovanie zirkónu ryolitovej interkalácie v permských sedimentoch a dajky ryodacitu v svoroch (infratatrium, Z. Karpaty) 135

Hangáč, R., Dlapa, P., Antal, B., Zvara, I., Kočícký, D. & Zlocha, M.

Modelovanie sorpčných vlastností pôd Slovenska pre potreby geologického informačného systému

Modelling of the sorption properties of soils in Slovakia for the purposes of geological information system 145

Jurkovič, L., Šottník, P., Sekula, P., Petková, K., Kotúč, J., Leššo, J., Bačík, M., Hiller, E. & Malý, V.

Geochemické hodnotenie environmentálnych rizík na lokalite opusteného Hg ložiska Merník (východné Slovensko)

Geochemical evaluation of environmental risks in locality of abandoned Hg-deposit Merník (Eastern Slovakia) 157

Baláž, P.

Hodnotenie využiteľnosti výhradných ložísk nerastných surovín aplikáciou analýzy SWOT

Evaluation of reserved mineral deposits usability applying a SWOT analysis 171

OBÁLKA: Pohľad na západ z hrebeňa Babinej (1 278 m n. m., Spišsko-gemerské rudohorie, Volovské vrchy, tektonická jednotka gemerikum; foto: Z. Németh). V pozadí na horizonte je Kráľova hoľa (1 946 m n. m., kryštalinikum severného veporika). Hrebeň Babinej je súčasťou zóny exhumovaných paleozoických metagabier (modré elipsy), ktorá sa začína na vrchu Ostrá (1 014 m n. m.) a pokračuje na východ cez vrchol Babinej až po Šajby (1 095 m n. m.). Výraznú tektonizáciu exhumovaných metagabier znázorňuje orientovaná makrovzorka s doplnenou orientáciou sklonu a deformačného elipsoidu.

V severnejšie ležiacom paralelnom pruhu hornín (červená elipsa) v rámci severogemerickej zóny vystupujú exhumované segmenty rulovo-amfibolitového komplexu paleozoického oceánskeho dna (metaofiolitová suita; schematické znázornenie je v červenom obdĺžniku). Ďalšie podrobnosti o danej problematike poskytujú články autorov Radvanec a Grecula, ako aj Németh et al. v tomto čísle časopisu.

COVER: View westward from the Babiná mountain range (1278 m a.s.l., the Spiš-Gemer Ore Mts., Volovec hills; Gemic unit; photo: Z. Németh). The Kráľova hoľa Mt. (1946 m a.s.l.; crystalline basement of the Veporic unit) is visible in the middle of the background. The Babiná mountain range is bearing a zone of exhumed metagabbros blocks (blue ellipses), which extends from the elevation point Ostrá (1014 m a.s.l.) and continues through the summit of the Babiná hill to elevation point Šajby (1095 m a.s.l.). The distinct tectonization of exhumed metagabbros is documented by oriented hand-sample with added dip parameters and axes of deformation ellipsoid.

Northward located parallel belt (red ellipse) within the North-Gemic zone is bearing the exhumed segments of the gneiss-amphibolite complex of Paleozoic oceanic crust (metaophiolite suite; red rectangle). Details about this topic are presented in papers by Radvanec and Grecula, as well as Németh et al. in this issue of the journal.

RNDr. Pavol Grecula, DrSc., geovedec európskeho formátu, oslávil osemdesiatku

RNDr. Pavol Grecula, DrSc., geoscientist of European format,
has celebrated his eightieth birthday

Výsledky dlhoročného vedeckého bádania jubilanta, popredného slovenského geológa RNDr. Pavla Greculu, DrSc., v problematike (1) novej platňovotektonickej interpretácie riftogénneho vývoja Spišsko-gemerského rudohoria (gemerika), (2) metamorfného modelu vzniku žilnej mineralizácie a (3) litostratigrafie paleozoika gemerika ovplyvnili náhľad veľkej časti vedeckej komunity na geodynamické a metalogenetické aspekty geologických procesov. Navyše, aktívnou publikačnou a prednáškovou činnosťou na báze medzinárodných korelačných projektov UNESCO/IUGS jubilant získal aj značné medzinárodné uznanie. Výsledkom jeho bohatej vedeckej práce je vyše sto odborných publikácií. *Stručný prehľad geodynamickej a metalogenetickej interpretácie gemerika poskytuje nasledujúci článok v tomto čísle časopisu.*

Pavol Grecula sa narodil 22. 2. 1936 v Nižnom Žipove v okrese Trebišov. Po maturite na trebišovskom gymnáziu študoval základný geologický výskum na Fakulte geologicko-geografických vied Slovenskej univerzity v Bratislave. Štúdium skončil v roku 1959 s červeným diplomom ako promován geológ. V ten istý rok začal aktívne pracovať v n. p. Geologický prieskum, kde postupne pôsobil vo všetkých odborných funkciách a neskôr sa stal vedúcim perspektívneho odboru. Jedným z výsledkov bádateľskej tímovej práce bola *Geologicko-ložisková štúdia Spišsko-gemerského rudohoria*, ktorú v rokoch 1967 – 1973 spracoval 120-členný autorský kolektív. P. Grecula bol spolu s J. Bartalským jej vedeckým redaktorom.

Obhajobou kandidátskej dizertačnej práce *Geologická stavba strednej časti gemeríd a jej vzťah k rudným ložiskám* získal P. Grecula v roku 1966 vedeckú hodnosť kandidát geologických vied (CSc.). Akademický titul doktor prírodných vied (RNDr.) získal na Prírodovedeckej fakulte Univerzity Komenského v Bratislave v roku 1967. V rokoch 1969 – 1972 na Vysokej škole technickej v Košiciach absolvoval postgraduálne štúdium drobnej tektoniky a petrotektoniky. Prvé obdobie jeho vedeckého bádania zavŕšila monografia konformná s jeho doktorskou dizertačnou prácou *Gemerikum – segment riftogénneho bazénu*



The results of decades lasting scientific investigation of the prominent Slovak geologist - RNDr. Pavol Grecula, DrSc. - on the issue of (1) a new plate tectonic interpretation of the Paleozoic riftogenesis of the Spiš-Gemer Ore Mts. (Gemic unit; Gemicum) (2) metamorphic model of the origin of the vein mineralization and (3) lithostratigraphy of Paleozoic sequences of Gemicum have influenced the scientific views of a large part of scientific community on geodynamic and metallogenetic aspects of geological processes. Moreover, the active publishing and lecturing on the basis of UNESCO/IUGS international

correlation programmes have brought him a considerable international recognition. His vivid scientific work has resulted in more than a hundred scientific publications. *The brief summary of geodynamic and metallogenetic interpretation of the Gemic unit (Gemicum) of the Western Carpathians is provided by the following paper in this issue of the journal.*

Pavol Grecula was born on 22. 2. 1936 in the village of Nižný Žipov in the Trebišov county. After graduating from the high school in Trebišov he has studied a basic geological research in the Faculty of geological-geographical sciences of the Slovak University in Bratislava. He finished his study in 1959 as graduate geologist with the honour of the red diploma. In the same year he started his active work in the national enterprise Geological Survey. He gradually worked in all professional positions and later he became the head of the Department of Perspectives. One of the results of research teamwork was represented by the *Geological-deposit study of the Spiš-Gemer Ore Mts.*, being processed by the 120-member team of authors within the years 1967-1973. Pavol Grecula and Ján Bartalský were the scientific editors of this study.

The successful defending of the thesis *Geological setting of the central part of Gemerides and its relation to ore deposits* has brought to Pavol Grecula the scientific degree of the Candidate of Geological Sciences (CSc.) in 1966. The academic title of Doctor of Natural Sciences (RNDr.) he obtained in the Faculty of Natural Sciences of Comenius University Bratislava in 1967. Later (1969-1972) in

Paleotetýdy (Grecula, 1982). V roku 1983 absolvoval stáž OSN zameranú na novú globálnu tektoniku a metalogenézu vo vtedajšom Leningrade. Vedeckú hodnosť doktor vied (DrSc.) mu udelila Slovenská akadémia vied v roku 1986.

V tom období už jubilant pôsobil v košickej pobočke Geologického prieskumu ako vedúci špeciálnej skupiny pre Spišsko-gemerské rudohorie a v rokoch 1987 až 1992 riešil rozsiahly projekt komplexných geologických, geofyzikálnych a geochemických prác *Spišsko-gemerské rudohorie – geofyzika*. Na riešení cieľov projektu sa zúčastnili desiatky slovenských geológov, geochemikov a geofyzikov, ale tiež geofyzici z Poľska. Náš jubilant sa zúčastnil na všetkých terénnych interpretáciách a mapovacích prácach. Na základe pozitívnych výsledkov projektu bol iniciovaný projekt zostavenia novej geologickej mapy Spišsko-gemerského rudohoria. V rokoch 1992 – 1995 bol geológom špecialistom a vedúcim oddelenia košického pracoviska a. s. Geocomplex a neskôr predsedom predstavenstva tejto spoločnosti. V tom období sa začal riešiť nový komplexný projekt *Atlas geomáp Spišsko-gemerského rudohoria*.

Popri riešení domácich projektov bol jubilant aktívne zaangažovaný do riešenia medzinárodných korelačných projektov UNESCO/IUGS IGCP č. 5 – *Korelácia predvariských a variských udalostí alpsko-mediterránej oblasti*, č. 254 – *Rudonosné čierne bridlice*, č. 276 – *Paleozoikum*

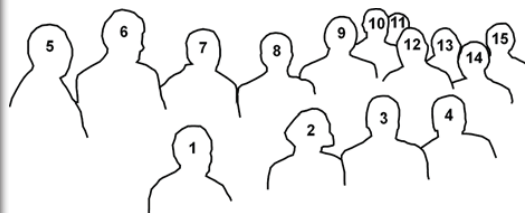
the Technical University in Košice he completed his postgraduate studies of the small-scale tectonic and petrotectonics. First period of his scientific research has culminated with a monograph conformal with his doctoral dissertation thesis *Gemerium – segment of the Paleotethyan riftogenous basin* (Grecula, 1982). In 1983, he completed an UN fellowship focussed on a new global tectonics and metallogenesis in former Leningrad. The scientific degree of Doctor of Science (DrSc.) was conferred him by the Slovak Academy of Sciences in 1986.

At that time Pavol Grecula already worked in the Košice branch of the Geological Survey in position of the Head of special group for the Spiš-Gemer Ore Mountains. In 1987-1992 he was the principal investigator of the extended project of comprehensive geological, geophysical and geochemical research – *The Spiš-Gemer Ore Mts. – Geophysics*. The project was solved by tens of Slovak geologists, geochemists and geophysicists, but also the geophysicists from Poland. Pavol Grecula participated in all field interpretations and geological mapping. The positive results led to launching of a new project for issuing of a new geological map of the Spiš-Gemer Ore Mts. In 1992-1995 he was in position of an expert geologist and a Head of the Košice Department of Geocomplex Comp. and later the Chairman of the Board of this company. At that time the research works on a new comprehensive project *Atlas of geomaps of the Spiš-Gemer Ore Mts.* have started.



Slávnostné otvorenie Pamätnej izby D. Andrusova, prvého riaditeľa ŠGÚDŠ. Foto: L. Martinský.

The opening ceremony of the Commemorative Room of D. Andrusov, the first director of ŠGÚDŠ. Photo: L. Martinský.



1 – RNDr. G. Andrusovová-Vlčeková, CSc.; 2 – Ing. N. Andrusovová, CSc.; 3 – A. Halahyja; 4 – Ing. J. Halahyja; 5 – RNDr. J. Michalík, DrSc. – GÚ SAV; 6 – RNDr. A. Panáček, CSc. – Geocomplex, a. s.; 7 – RNDr. J. Vozár, CSc. – ŠGÚDŠ; 8 – RNDr. P. Grecula, DrSc. – ŠGÚDŠ; 9 – doc. RNDr. M. Kaličiak, CSc. – ŠGÚDŠ; 10 – RNDr. K. Marsina, CSc. – ŠGÚDŠ; 11 – RNDr. V. Bezák, CSc. – ŠGÚDŠ; 12 – RNDr. M. Polák, CSc. – ŠGÚDŠ; 13 – RNDr. J. Zuberec, CSc. – ŠGÚDŠ; 14 – RNDr. I. Túnyi, CSc. – GfÚ SAV; 15 – RNDr. J. Mello, CSc. – ŠGÚDŠ.

Tetýdy a č. 443 – *Magnezity a mastence – geologické a environmentálne korelácie*. Medzinárodná aktivita v spojení s domácimi projektmi vyústila aj do ďalších rozsiahlych monografických prác: *Variscan and pre-Variscan events in the Alpine-Mediterranean belts* (red. H. W. Flügel, F. P. Sassi a P. Grecula, 1987), *Ložiská nerastných surovín Slovenského rudohoria*, zv. 1 (red. P. Grecula, 1995), *Variscan metallogeny in the Alpine orogenic belt* (red. P. Grecula a Z. Németh, 1996), *Geological evolution of the Western*

In addition to research of national projects, Pavol Grecula was actively involved into international correlation projects of UNESCO/IUGS IGCP - No. 5 - *Correlation of Variscan and pre-Variscan events in the Alpine-Mediterranean mountain belt*, No. 254 - *Metalliferous black shales*, No. 276 – *Paleozoic of the Tethys* and No. 443 - *Magnesite and talc – geological and environmental correlations*. International activity in conjunction with national projects led to issuing of extended monographs – *pre-Variscan and*

Carpathians (ed. P. Grecula, D. Hovorka a M. Putiš, 1997). V monografii *The Geology of Central Europe, Vol. 2.* (ed. T. McCann, London, 2008) spracoval v kapitole *Fossil fuels and industrial minerals* charakteristiku ložísk nerastných surovín z oblasti Západných Karpát a ich metalogenézu.

Pavol Grecula bol zakladateľom časopisu *Mineralia Slovaca* a jeho dlhoročným vedúcim redaktorom (1969 – 2006). V súčasnosti sú všetky články publikované v časopise počas 48 rokov jeho nepretržitého vychádzania dostupné na www.geology.sk/mineralia. V rokoch 1976 – 2001 vychádzalo až šesť čísel časopisu. Popri početných vedeckých monografiách zaujali aj retrospektívne zhodnotenia geologického bádania na Slovensku – dvojzväzkové dielo *História geológie na Slovensku* a publikácia *Významní slovenskí geológovia*. Keďže bol jubilanť účastníkom všetkých novodobých udalostí slo-



RNDr. Pavol Grecula, DrSc., riaditeľ ŠGÚDŠ, odovzdáva Pamätnú medailu ŠGÚDŠ za rozvoj geológie a spoluprácu riaditeľovi MAFI Dr. K. Brezsnianszkému. Foto: L. Martinský.

RNDr. Pavol Grecula, DrSc., Director of ŠGÚDŠ, gives the ŠGÚDŠ Commemorative Medal for the Development of Geology and Cooperation to MAFI Director Dr. K. Brezsnianszky. Photo: L. Martinský.

venskej geológie, jeho autorský vklad do uvedených retrospektívnych publikácií je zákonitý. Popri vedúcej pozícii v časopise *Mineralia Slovaca* bol členom redakčných rád aj iných geologických časopisov – *Geologica Carpathica*, *Slovak Geological Magazine*, *Acta Montanistica Slovaca* a poľského periodika *Przegląd geologiczny*.

Dňa 1. januára 1996 sa Pavol Grecula stal riaditeľom novozaloženej Geologickej služby Slovenskej republiky (od 1. júna 2000 Štátneho geologického ústavu Dionýza Štúra). Geologická služba Slovenskej republiky (GS SR)

Variscan events of the Alpine-Mediterranean mountain belt (ed. H. W. Flügel, F. P. Sassi & P. Grecula, 1987), *Mineral deposits of the Slovak Ore Mts., Part 1* (ed. P. Grecula, 1995), *Variscan metallogeny in the Alpine orogenic belt* (eds. P. Grecula & Z. Németh, 1996), as well as *Geological evolution of the Western Carpathians* (eds. P. Grecula, D. Hovorka & M. Putiš, 1997). For the chapter *Fossil fuels and industrial minerals* of the monograph *The Geology of Central Europe, Vol. 2.* (ed. T. McCann, London, 2008) Pavol Grecula wrote a review of industrial minerals deposits in the Western Carpathians and their metallogenesis.

Pavol Grecula was the founder of the magazine *Mineralia Slovaca* and his longtime leading editor (1969-2006). All articles published in over 48 years of continuous issuing of the journal, are recently available on www.geology.sk/mineralia. In 1976-2001, altogether six numbers of the journal were issued annually. In addition to numerous scientific monographs, also retrospective reviews of the geological research in Slovakia have obtained a high appreciation by the readers - two-volume *History of geology in Slovakia* and the publication *Significant Slovak geologists*. Pavol Grecula has participated in all events of modern Slovak geology, so his principal contribution to afore mentioned retrospective publications is obvious. In addition to a leading position in the magazine *Mineralia Slovaca* he was a member of editorial boards also of other geological journals – *Geologica Carpathica*, *Slovak Geological Magazine*, *Acta Montanistica Slovaca* and Polish periodical *Przegląd geologiczny*.

On 1 January 1996 Pavol Grecula became a director of newly established *Geological Survey of Slovak Republic* (GS SR; on 1 June 2000 being renamed to the State Geological Institute of Dionýz Štúr – ŠGÚDŠ). Geological Survey of Slovak Republic in Bratislava has originated by merging of three organizations: the state enterprise *Slovak Geology* in Spišská Nová Ves, contributory organization *Geological Institute of Dionýz Štúr* in Bratislava and organization *Geofond*, which operation was fully covered by the state budget. In the newly formed joint organization he played a significant role in establishing economic governance of the three originally differently managed organizations. He enforced adding new competences to main activities of new institution. Owing to his activity, the revitalization of all branches of the newly established institution was done, including the regional geology, which was secured, in addition to short-term projects, mainly by the large regional projects with the multiannual duration of works. Also the issuing of regional geological maps at a scale of 1:50000 was intensified.

Pavol Grecula was the initiator of further adaptation of the Foundation Certificate of the Geological Survey of Slovak Republic with its definition as a scientific and research organization and establishing of new regional geological centers in the towns of Banská Bystrica and Košice.

v Bratislave vznikla zlúčením troch organizácií: štátneho podniku Slovenská geológia v Spišskej Novej Vsi, príspevkovej organizácie Geologický ústav Dionýza Štúra v Bratislave a rozpočtovej organizácie Geofond. V novovzniknutej organizácii sa podstatnou mierou podieľal na zavedení ekonomického systému riadenia troch pôvodne rozdielne hospodáriacich organizácií. Presadil doplnenie hlavnej činnosti ďalšími právomocami. Zásluhou jeho vtedajšej činnosti sa uskutočnila revitalizácia všetkých odvetví novozriadenej inštitúcie vrátane regionálnej geo-



P. Grecula (v strede) so záujmom sleduje športové súťaže zamestnancov vtedajšej GS SR. Vyhne 1999. Foto: L. Martinský.

P. Grecula (in the middle) observes with interest the sport competitions of employees of former GS SR. Vyhne resort 1999. Photo: L. Martinský.

lógie, čo bolo zabezpečené popri krátkodobých projektoch hlavne veľkými regionálnymi projektmi s viacročným obdobím riešenia. Zintenzívnilo sa aj vydávanie regionálnych geologických máp v mierke 1 : 50 000.

Pavol Grecula bol iniciátorom aj ďalšej úpravy zriaďovacej listiny Geologickej služby Slovenskej republiky s jej definovaním ako vedeckej a výskumnej organizácie a zriadením nových regionálnych geologických centier v Banskej Bystrici a Košiciach. Zriadil aj knižničnú komisiu a referenčné laboratórium. Výrazne posilnil environmentálnu činnosť. Ku skvalitneniu výstupov geologických prác prispelo aj zriadenie geofyzikálneho oddelenia. Získaním projektov z domácich aj zahraničných zdrojov sa podarilo revitalizovať aj pracovisko aplikovanej technológie nerastných surovín (ATNS) v Košiciach. Geoanalytické laboratóriá v Spišskej Novej Vsi získali niekoľko certifikátov kvality, vypracovali sa na európsku úroveň a získali aj zahraničné zákazky. V roku 2000 sa zakúpil v tom čase najmodernejší elektrónový mikroanalýzátor CAMECA SX 100, ktorý výrazne skvalitnil petrologický a mineralogický výskum na Slovensku a využíva sa až do dnešných dní, a to aj zahraničnými bádateľmi.

Kvôli poskytovaniu kvalitných a rýchlych informácií o výsledkoch prác geologického výskumu a prieskumu

He established also the Dionýz Štúr Publishers, the libraries Commission and the reference laboratory. The environmental activities were significantly strengthened. The establishing of geophysical department also contributed to improvement of outcomes of geological works. Acquisition of projects from domestic and foreign sources allowed to revitalize also the Department of Applied Technology of Raw Minerals (ATNS), seated in Košice. Geoanalytical laboratory in Spišská Nová Ves has received several Quality Certificates, reaching the European quality level and obtained numerous foreign orders. In 2000, that time the most modern microprobe Cameca SX 100 was purchased, which significantly improved the petrological and mineralogical research in Slovakia and is used to present days also by the foreign researchers.

For providing the high quality and rapid information on the results of geological research and exploration, being archived in the Geofond, the digitization of archived materials has begun, as well as the reorganization of the sample documentation. Reconstruction of the building in the ŠGÚDŠ complex allowed the creation of a modern Geofond information center.

In the field of international cooperation, Pavol Grecula has ensured the continuous compliance of bilateral agreements with neighbouring countries and their renewal with Finland, France, the UK and the U.S.A. The international reputation of GS SR was also increased by international project DANREG, as well as the FOREGS (Forum of European Geological Surveys) meetings, next by organizing of the meeting of CEI (the Central European Initiative), as



P. Grecula pri otvorení športových hier vo Vyhniach v roku 1999. Foto: L. Martinský.

P. Grecula at opening of the sport games in the Vyhne resort in 1999. Photo: L. Martinský.

well as other significant events. In June 1998, he organized a meeting of representatives of the geological institutes from Ukraine, Poland, Czech Republic, Austria, Hunga-

Na základe návrhu vedeckej rady ŠGÚDŠ generálny riaditeľ Ing. Branislav Žec, CSc., udelil 24. novembra 2016 Cenu Dionýza Štúra za rok 2016 v kategórii *Osobnosti* RNDr. Pavlovi Greculovi, DrSc. Cenu odovzdala vedúca služobného úradu Ministerstva životného prostredia Slovenskej republiky JUDr. Ľubomíra Kubišová spolu s generálnym riaditeľom ŠGÚDŠ Ing. Branislavom Žecom, CSc. Foto: Ľ. Šebesta.

Following a proposal of the ŠGÚDŠ Scientific Council, on 24 November 2016 General Director Ing. Branislav Žec, CSc., awarded RNDr. Pavol Grecula, DrSc., by the Dionýz Štúr Prize in the Celebrity category. Award was handed over by the Head of Staff Office at the Ministry Environment of the Slovak Republic JUDr. Ľubomíra Kubišová together with the General Director of ŠGÚDŠ Ing. Branislav Žec, CSc. Photo: Ľ. Šebesta.

sústredených v Geofonde sa začalo s digitalizáciou archivovaných materiálov a s reorganizáciou hmotnej dokumentácie. Prestavba budovy v areáli ŠGÚDŠ umožnila vytvorenie moderného informačného centra Geofondu.

Na poli medzinárodnej spolupráce Pavol Grecula zabezpečil pokračovanie plnenia bilaterálnych dohôd s okolitými štátmi a ich obnovenie s Fínskom, Francúzskom, Veľkou Britániou a USA. K medzinárodnému zviditeľneniu GS SR prispel aj medzinárodný projekt *DANREG* a tiež stretnutia FOREGS (Fórum európskych geologických služieb) či organizovanie zasadnutia CEI (Stredoeurópskej iniciatívy) a iných významných podujatí. V júni 1998 zorganizoval stretnutie predstaviteľov geologických ústavov z Ukrajiny, Poľska, Česka, Rakúska, Maďarska, Rumunska a Slovenska, na ktorom okrem iných spoločných aktivít sa dohodol spoločný projekt *Flyšové pásma Východných Álp a Karpát*.

Jubilant dlhé roky patrili medzi piliere Slovenskej geologickej spoločnosti. V košickej pobočke SGS bol predsedom v rokoch 1980 – 1990. Neskôr v rokoch 1992 – 1997 bol predsedom slovenského výboru IAGOD (International Association on the Genesis of Ore Deposits). Bol aj členom vedeckej rady Fakulty BERG (Fakulty baníctva, ekológie, riadenia a geotechnológií) Technickej univerzity v Košiciach. Pracoval ako člen viacerých odborných komisií na udeľovanie hodnosti PhD. a bol aj členom komisie na udeľovanie vedeckej hodnosti DrSc.

Po skončení riadiacej činnosti v ŠGÚDŠ sa Pavol Grecula vrátil v roku 2001 k aktívnemu pôsobeniu v základnej geológii ako redaktor novej *Geologickej mapy Spišsko-gemerského rudohoria v mierke 1 : 50 000* (vydaná v roku 2007) a s ňou súvisiacich vysvetliviek (2009).

Jubilantovi RNDr. Pavlovi Greculovi, DrSc., prajeme do ďalších rokov železné zdravie, rovnako ako povestný „otcovský vzťah“ k mladším kolegom, pre ktorých bol a je oporou a inšpiráciou.



ry, Romania and Slovakia, where besides other activities also a joint project „Flysch belt of Eastern Alps and Carpathians“ was agreed.

Pavol Grecula many years belonged among the pillars of the *Slovak Geological Society* (SGS). In the Košice branch of SGS he was the chairman within the years 1980-1990. Later - in 1992-1997 - he was the chairman of the Slovak Committee of IAGOD (International Association on the Genesis of Ore Deposits). He was also a member of the Scientific Council of the BERG Faculty (Faculty of Mining, Ecology, Process Control and Geotechnology) of Technical University in Košice. He worked as a member of several expert committees for the granting PhD. degrees, and he was also a member of the Commission for granting the DrSc. scientific degree.

After terminating of managing work in the ŠGÚDŠ in 2001, Pavol Grecula has returned to active geological research as an editor of newly prepared *Geological map of the Spiš-Gemer Ore Mts. at a scale of 1:50 000* (issued in 2007) and related explanations to this map (2009).

On the occasion of important jubilee, we wish RNDr. Pavol Grecula, DrSc., for further years a good health, as well as continuation of his well known “paternal relationship” to younger colleagues, who always benefited from his support and inspiration.

Z. Németh & M. Putiš
v mene slovenskej geovednej komunity
on behalf of the Slovak geoscience community

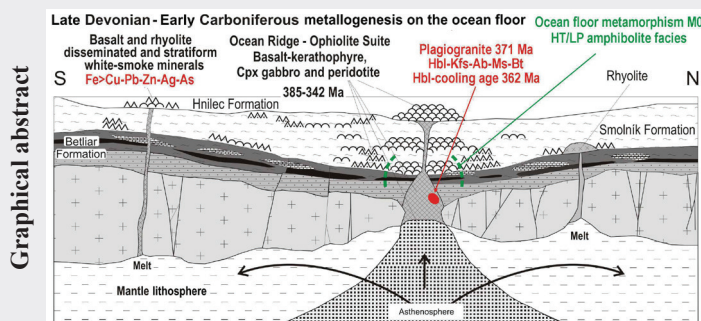
Geotectonic and metallogenetic evolution of Gemicum (Inner Western Carpathians) from Ordovician to Jurassic

MARTIN RADVANEČ and PAVOL GREČULA

State Geological Institute of Dionýz Štúr, Mlynská dolina 1, SK-817 04 Bratislava, Slovakia;
martin.radvaneč@geology.sk

Abstract: The Early Paleozoic evolution of Gemicum is connected with opening a riftogeous basin. The evolution of the pre-rift stage was bound to an active (Gondwana) continental margin in Cambrian to Ordovician times. The first phases of continental rifting represent the megacycles of the sedimentary basin fill with bimodal volcanism of inferred Devonian age. During the last phases of rifting in the middle part of the rift a mid-oceanic ridge has developed, being accompanied with the first metamorphic recrystallization M0 (LP/HT amphibolite facies), producing new oceanic-type crust, recently representing a part of Rakovec (Zlatník) and Klátov ophiolitic complexes (LP/HT amphibolite facies). The massive effusions and extrusions have provided ages ca 410-380 Ma. The Early Paleozoic complexes were deformed in the Early Carboniferous, when also subduction-accretionary wedge metamorphism M1a (pumpellyite-actinolite facies) has occurred. Part of the mid-oceanic ridge complexes and their associated sediments were subducted northward, but the rest underwent obduction, forming an accretionary wedge. This process transported most of the Early Paleozoic basin fill over the northern continental plate in the form of nappes. Subduction ceased in the Late Carboniferous, being accompanied by further plate convergence and formation of mélangé-related conglomerates. In Permian period, the late-Variscan post-collision collapse and uplift of the asthenosphere have increased the thermal gradient beneath the overlying plate. The Permian high thermal gradient brought about regional metamorphism associated with anatectic melting, causing formation and emplacement of granite during the late Variscan metamorphic phase M1b (amphibolite facies), coinciding with the beginning of origin of Fe-carbonate mineralization. During Permian, previous subduction processes culminated in the formation of an island arc associated with rhyolitic volcanism and granite intrusions. Late compressional and extensional Variscan tectonic processes completed the Variscan nappe structure of the Gemicum and marked the transition to the extensional phase, associated with the origin of Alpine sedimentary basins. In Jurassic, Gemicum was exposed to a compressional deformation. The structural pattern was a result of the rebound of the lithospheric mantle and asthenosphere after their loading by subducted material in the Permian. At the beginning, reverse movement of the asthenosphere exhumed blocks of metamorphic rocks of the high-pressure, low-temperature blueschist facies (M2), followed towards the end by the uplift of high-pressure metaperidotites from the great depths of minimum 50 km and embedded into unmetamorphosed sediments of Permian-Mesozoic units. Paper provides summary of metallogenetic processes related to each evolutionary phase.

Key words: geotectonic model, metallogenetic model, Paleozoic, Gemicum, Western Carpathians



- Paper provides a unique model of continual Early Paleozoic-Mesozoic subduction of the Paleo-Tethys from the south of Gemicum under north located units of Western Carpathians
- Metallogenetic products are summarized for all phases of geodynamic evolution with great emphasis on metamorphic model of fluids generation

Introduction

The Gemicum during its Variscan evolution has underwent several events, being recorded in Gemic Paleozoic sedimentary and magmatic complexes, several subsequent tectonic deformation and metamorphic events,

as well as different genetic types of mineralization, being for the first time summarized by Grečula and Radvaneč (2005a) in geotectonic model of continual Ordovician-Jurassic evolution. This model took into account also the previous works by Grečula (1982), as well as Radvaneč (1998), Grečula (1998), Grečula et al. (1995), Kobulský

(2001), Grecula and Radvanec (in Kobulský, 2001), as well as Németh (2002). Field works related to exploration and verification of mineral deposits have confirmed a new lithostratigraphic division of the Early Paleozoic rocks and represented a starting point for defining the sequence of sedimentary, magmatic and tectonic events, as well as related general geotectonic interpretation of paleotectonic evolution of Gemericum (Grecula, 1982; Grecula et al., 1995).

This study is based on detail geological mapping of the whole area of Gemericum, construction of new geological map, detail lithological knowledge of Paleozoic sequences, as well as their metamorphic and tectonic overprint (Grecula et al., 2009). Above stated genetic model we make complete by geochronological data (Putis et al., 2009; Radvanec, et al., 2009 and 2010).

Metallogenetic evolution of Gemericum is closely tied with geotectonic evolution of this unit (Grecula et al., 1995). The oldest stratabound sulphidic mineralization is bound on Early Paleozoic oceanic rift zone with bimodal basalt-keratophyre volcanism (Radvanec and Bartalský, 1987, 1988; Radvanec and Grecula, 1985; Radvanec et al., 1993; Grecula et al., 1995). The younger Variscan metallogenetic events are closely related to metamorphic overprint (Fe-, Mn-, Mg-carbonatic and sulphidic mineralization) and anatexis melting (S-type of granite, Sn, Mo, W, B and Li mineralization) within the Late Carboniferous-Late Permian period (Radvanec, 1987; Radvanec et al., 1990; Grecula et al., 1991; Bartalský and Radvanec, 1993; Grecula et al., 1995; Žák et al., 1991; Íro and Radvanec, 1997; Radvanec et al., 2004; Grecula and Radvanec, 2005b; Žák et al., 2005; Jiang et al., 2008; Radvanec et al., 2010). The Permian U-Mo-REE mineralization is tied with a volcanic equivalent of S-type granite (Grecula et al., 1995). Mineralizations of the platinum group elements (PGM), Sc, Cd and V occur in metapyroxenite, prehnite-pyroxenite (metalamprophyre), rodingite and serpentinite, being exhumed with blueschists in Jurassic time (Radvanec and Uher, 2016; Radvanec, 2005).

The Early Paleozoic evolutionary riftogeneous phases from the Late Ordovician to Early Carboniferous

The Early Paleozoic evolution of Gemericum we interpret by the model of Late Ordovician-Early Carboniferous riftogenesis of a part of Paleotethys. The sedimentary area was described in details by Grecula (1982), as well as Grecula et al. (1995, 2009 and 2011), which geotectonic evolution (Grecula, 1973; Grecula and Radvanec, 2005a) has started with rift, developing on continental plate in the northern part of Gondwana. The Ordovician pre-rift phase is dated by zircon ages in the range 482-458 Ma, obtained from volcanic rocks of rhyolite and dacite composition, as well as clinopyroxene (Cpx) gabbro in all

partial Variscan nappes of Gemericum (Putiš et al., 2009; Grecula et al., 2009 and 2011). In localities Ostrá, Babiná, Šajby and Dobšinský potok in the northern zone of Gemericum and in localities Lastovičí vrch and Zadné Porče in the southern Gemericum, the gabbro encompasses the magmatic diopside (large up to 2.5 cm), Mg-chromite, Sr-epidote and albite, as well as other minerals. Sr-epidote and albite originated by the decomposition of former Sr-plagioclase during following post-Ordovician poly-metamorphism (Radvanec, 1999). Cpx-gabbro has the lower crust geochemical characteristics (Fig. 1).

The beginning of the rapid riftogenesis – the second rifting phase - in the Early Paleozoic sequences of Gemericum is indicated by Silurian, resp. Late Silurian-Early Devonian sporomorphs, acritarchs and radiolarians from the upper part of the lower Gemeric lithostratigraphic unit - the Holec Beds. This period represents advanced stage of riftogenesis with formation of anoxic basins with lydites and black pelites and first manifestations of volcanic activity of bimodal basalt-keratophyre volcanism mainly in their overlier (Grecula et al., 2009 and 2011). These volcanic effusions are accompanied with the origin of stratabound sulphidic mineralization of the Smolník type with prevailing Fe >> over Cu > Zn (pyrite prevails over chalcopyrite and sphalerite). In keratophyre the Ba + Mo + Sn association was found (Radvanec and Bartalský, 1987; Radvanec and Grecula, 1985; Radvanec et al., 1993; Grecula et al., 1995). The second riftogenous phase of Late Silurian-Early Devonian age with typical sedimentary facies is interpreted like the first geotectonic-sedimentary megacycle of the Gemeric complex producing the lithology of Betliar Formation, Holec Beds with limestones and Smolník Formation (Grecula et al., 2009 and 2011, Fig. 2).

The main rifting phase (Fig. 3) has continued in the Late Devonian to Early Carboniferous at first with bimodal volcanism and later finished with basalt volcanism (Grecula et al., 2009 and 2011). These geotectonic events have produced distinct segmentation of the sedimentary basin with very variegated facial evolution of clastic sediments (Smolník Formation), characterizing the paleogeographic conditions of their origin and position in the sedimentary space of the rift developing on continental crust. The rocks sequences belonging to these facies are so distinct that can be reliable areally limited and together with further lithologies to be attributed into individual lithostratigraphic and tectonic units. Third main rifting phase has bordered the axial part of the basin. Its beginning was in the Late Silurian or the Early Devonian (Fig. 2). The period between the 1st and 2nd rifting phases would encompass the period of Early to Middle Devonian.

The beginning of the 3rd rifting phase (Fig. 3) is represented with the upper bimodal volcanic complex consisting of the basalt and rhyolite effusions. This volcanic activity was accompanied with stratabound sulphidic

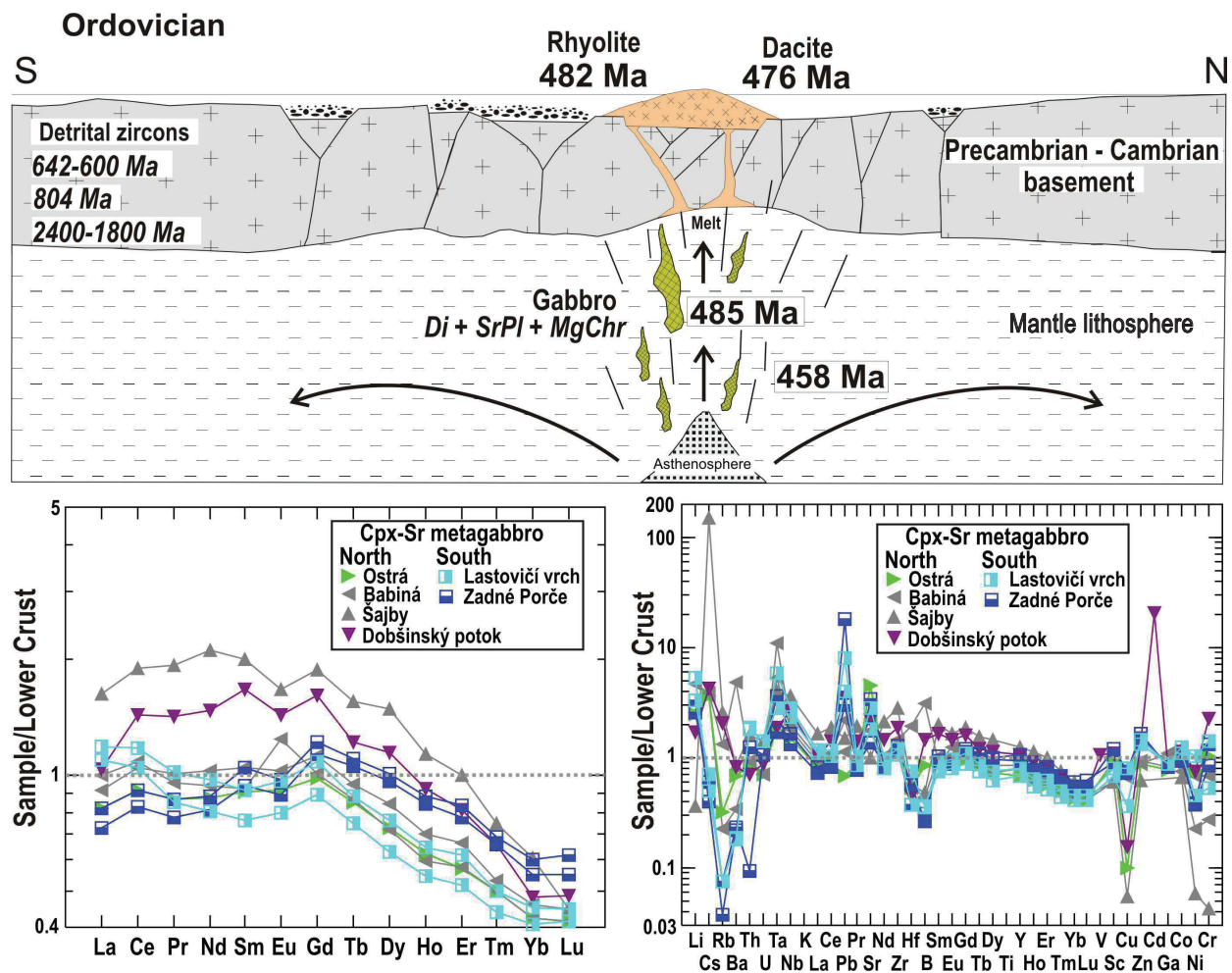


Fig. 1. Model of geotectonic and lithological evolution of the Paleo-Gemic complex in Ordovician and the whole-rock chemical analyses of Cpx-gabbro with original Sr plagioclase normalized on lower crust contents. Localities of tectonic blocks of Cpx-gabbro with original Sr plagioclase in the northern and southern zones of Gemicum. Di – diopside, SrPl – Sr plagioclase, MgChr – Mg chromite. Numbers state the zircon ages in Ma.

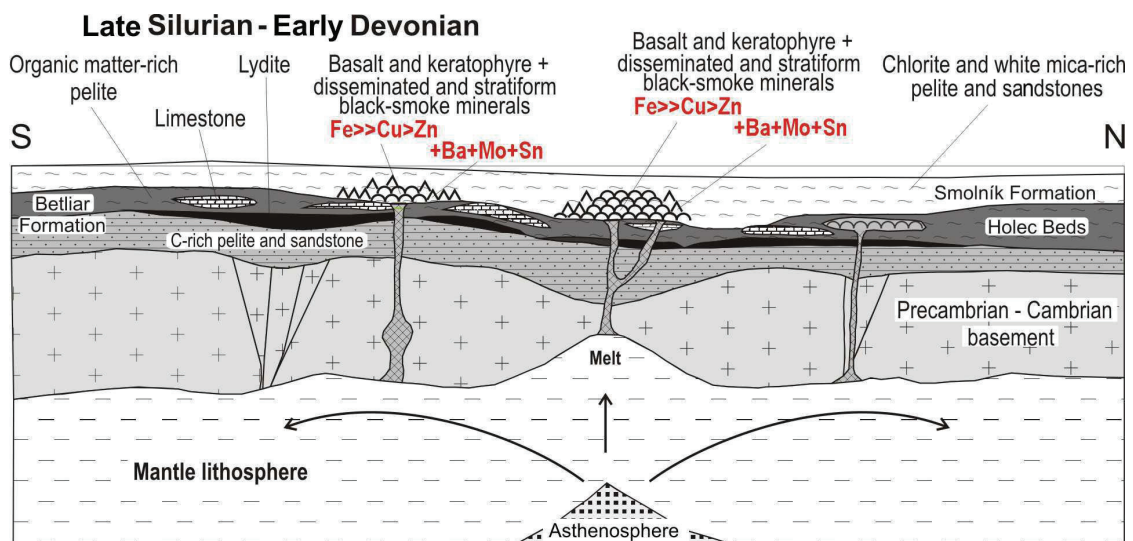


Fig. 2. Model of the Late Silurian-Early Devonian geotectonic and lithological evolution of Gemicum.

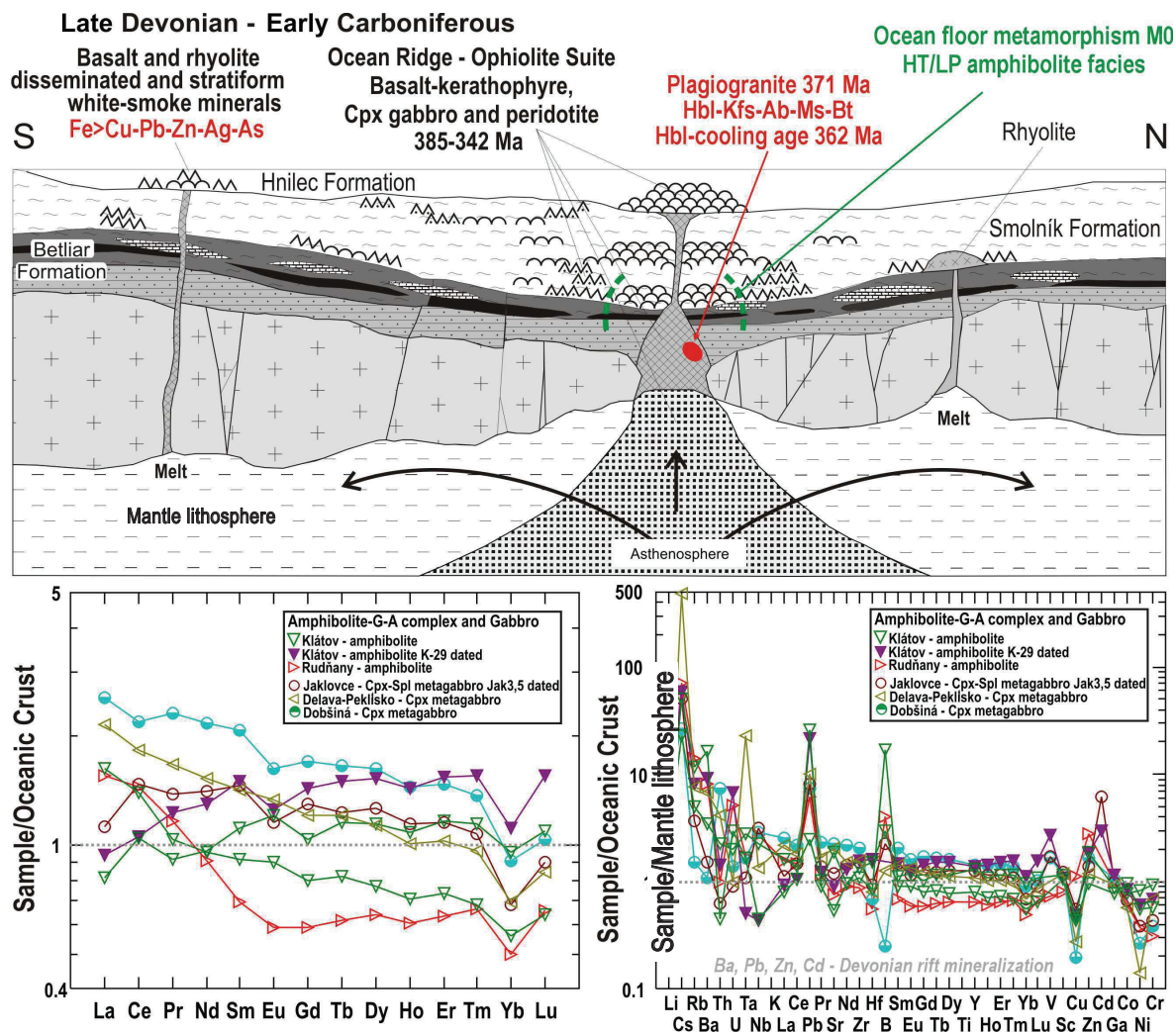


Fig. 3. Model of the Late Devonian to Early Carboniferous geotectonic and lithological evolution of Gemericum. The main phase of the origin of ophiolite suite, plagiogranite and the ocean floor metamorphism M0. Normalization of the whole-rock analyses on oceanic crust.

mineralization of the Mníšek nad Hnilcom type with prevailing Fe over Cu-Zn-Pb-Zn-Ag and As contents, pyrite above chalcopyrite, galenite and sphalerite (Grecula et al., 1995). In the central part of the rift the mid-oceanic ridge has originated with gradually widening oceanic crust with the origin of rocks of the present day Rakovec complex (nappe, Grecula et al., 2009 and 2011). In the area of the mantle asthenosphere uprise the rock complexes of the mid-oceanic ridge have been metamorphosed to amphibolites and gneisses. This metamorphism of oceanic crust is characterized by a high temperature and low pressure conditions and related HT/LP metamorphism M0. In the rift area the plagiogranite has originated, being composed of hornblende, K-feldspar, albite, muscovite and biotite. According to Rb-Sr isochrone from these minerals, the plagiogranite age is 371 ± 4 Ma and cooling of hornblende has an age of 362 Ma. These ages are in good agreement with the zircon ages from the gneiss-amphibolite complex

in the range 385-342 Ma (Putiš et al., 2009). The main Late Devonian-Early Carboniferous rifting phase is represented with a complete ophiolite suite: serpentinites/meta-peridotites, Cpx-gabbros with plagioclase and chromite and the gneiss-amphibolite complex in localities Dobšiná, Delava, Rudňany, Jaklovce, Strážny vrch and Klátov in the northern, but also southern Gemericum (serpentinite, the Strážny vrch locality). The rocks of ophiolite suite manifest in all known localities the tectonic contact with their surrounding rocks. The normalization of chemical composition of samples from the amphibolite complex and metagabbros of ophiolite suite is in good agreement with the oceanic crust (Fig. 3). The serpentinites from Klátov and Strážny vrch localities manifest a komatiite composition. In further parts of the basin on continental crust the clastic sedimentation with local rhyolite volcanism has continued. The 3rd rifting phase has completed the paleogeography of the Early Paleozoic sedimentary area, and

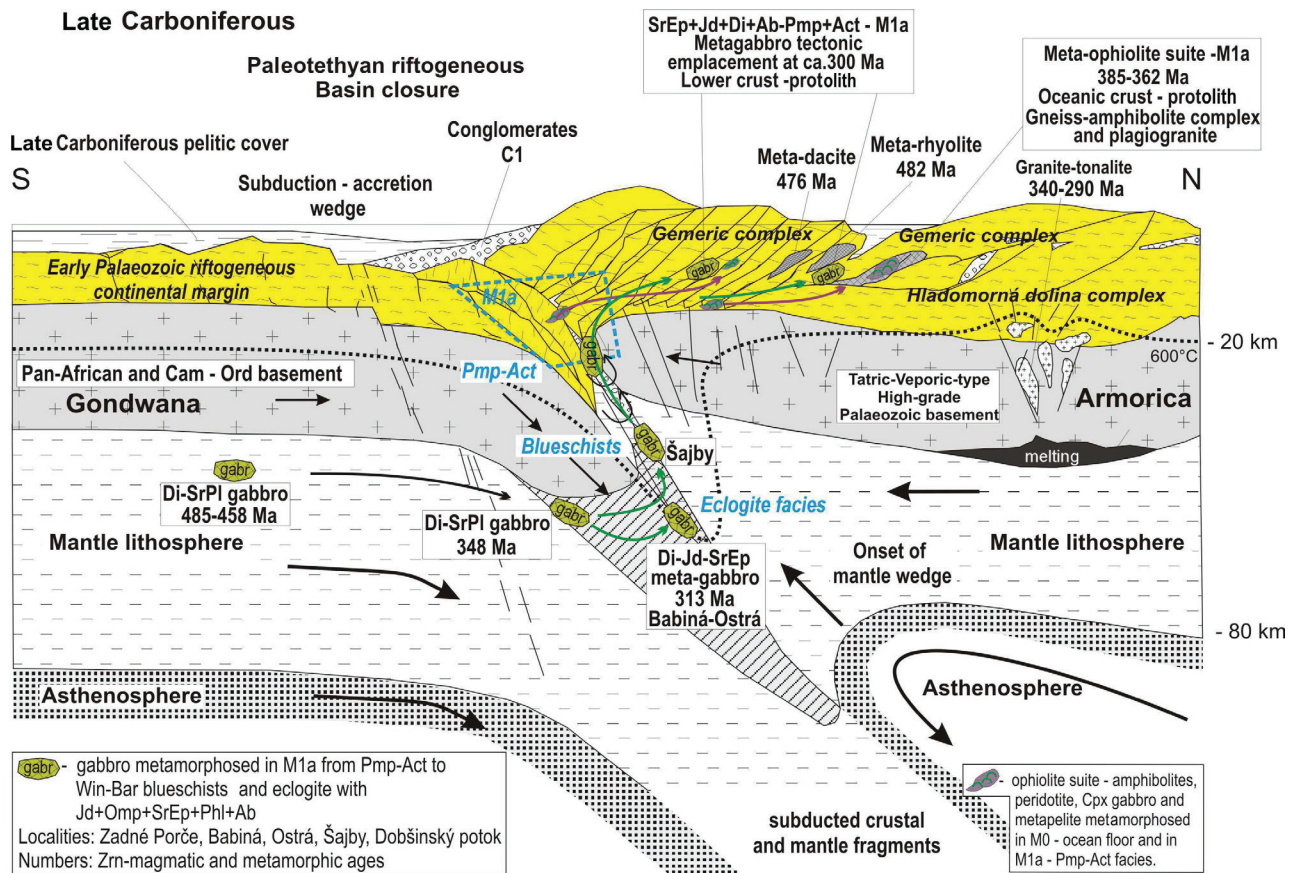


Fig. 4. Model of geotectonic and lithological evolution and obduction of Gemic complex in the Late Carboniferous. Exhumation and emplacement of tectonic blocks of Cpx gabbros with Di – diopside, Jd – jadeite, SrEp – Sr epidote, Ab – albite, Pmp – pumpellyite, Act – actinolite, Omp – omphacite, Phl – biotite (protolith, lower crust) and position of tectonic blocks of metaophiolite suite (protolith, oceanic crust). M1a – pumpellyite-actinolite facies. Win-Bar – winchite-barroisite - blueschists facies. Jd+Pmp+SrEp+Phl+Ab – boundary of eclogite facies. Conglomerates C1- coarse-clastic conglomerates, Early Carboniferous.

by this way also characteristic facial developments of the uppermost lithostratigraphic unit – the Hnilec Formation – as well as the Early Paleozoic evolutionary phase (Grecula et al., 2009 and 2011).

Late Paleozoic phase of convergent Variscan events

The following phase of Variscan cycle has probable started in the Devonian/Carboniferous boundary period. The paleontologically proved Late Viséan sediments were deposited on folded and metamorphosed Early Paleozoic footwall. In the Early to Middle Carboniferous a new deformation phase in the Early Paleozoic complexes started, encompassing the beginning of **subduction processes**. In this period an accretion basin has originated with sedimentation of coarse clastic material derived from the Early Paleozoic rock sequences prevailing of oceanic ridge, but also granites-tonalites (Radvanec, 1998). Part of these coarse clastic complexes (e.g. the Rudňany conglomerates) was dragged to subduction channel together with further rocks (Fig. 4). The shortening of the sedimentary space

has continued in the Late Carboniferous by obduction and formation of Variscan nappes.

The majority of rocks from the mid-oceanic ridge (ophiolite suite) as well as surrounding sediments were obducted. By this way the accretion prism complexes were thrust on the northern continental plate (Fig. 4). Seven Variscan nappes were distinguished from the south northward: Medzev, Jedľovec, Humel, Prakovce, Mníšek, Kojšov and Rakovec nappes (Grecula, 1982; Grecula et al., 2009 and 2011). Characteristic pumpellyite-actinolite metamorphic facies of this compression/obduction phase and starting subduction is designated as M1a. For the ophiolite suite rocks, being metamorphosed by the M0 metamorphism in the oceanic crust (HT/LP – amphibolite and epidote-amphibolite facies), the M1a metamorphism represents the retrogression and compression metamorphism, similarly as for the Cpx gabbros exhumed from the lower crust (in localities Babiná, Ostrá, Šajby, Dobšinský potok, Lastovičí vrch and Zadné Porče) with jadeite – omphacite – Sr epidote – albite assemblage, being in the Late Carboniferous (313 Ma) exhumed from the depth of eclo-

gite facies on 600 °C isograd (Babiná, Ostrá) resp. from the blueschists zone (Šajby) to M1a – pumpellyite-actinolite facies metamorphism (Radvanec, 1999 and 2000).

In the Late Carboniferous (Fig. 4) there starts a subduction, as well as convergence of the Gondwana and Armorica plates. The asthenospheric uprise in the footwall of active plate has continued. In the subduction channel a part of earlier subducted material has returned back to surface, including the Rudňany conglomerates (Radvanec, 1998) as well as exhuming tectonic blocks of Cpx-Sr metagabbros from the lower crust (Radvanec, 1999). The uplift of asthenosphere beneath the active plate caused an increase of the temperature. It is supposed that the 600 °C isograd in this stage has reached the upper part of the continental crust and has corresponded to conditions of the gradient of continental orogenic belt, i.e. the regional (orogenic) metamorphism. In Veporic complexes

in this isograd there originated the anatectic melt, resp. granite-tonalite melt with revealed ages of 340-290 Ma, being subsequently emplaced in the Veporic rock sequence (Fig. 4).

In Permian and Triassic, the Variscan subduction processes have produced the origin of island arc rhyolite, andesite and basalt volcanism and granite magmatism (Fig. 5). There originated the anatectic granites of S-type with Sn-W-Mo-B-Li-F-As mineralization in their immediate surrounding. In the surrounding of Permian volcanoes, close to the surface, or on the surface, the U-Mo-REE mineralization and gypsum/anhydrite deposits have developed (Grecula et al., 1995). In the area of geothermal gradient along the hot lines, the medium-pressure metamorphic events in epidote-amphibolite or amphibolite facies (M1b) have occurred. Numerous tectonic blocks of Cpx gabbros with Sr epidote, blocks of ophiolite suite, Ear-

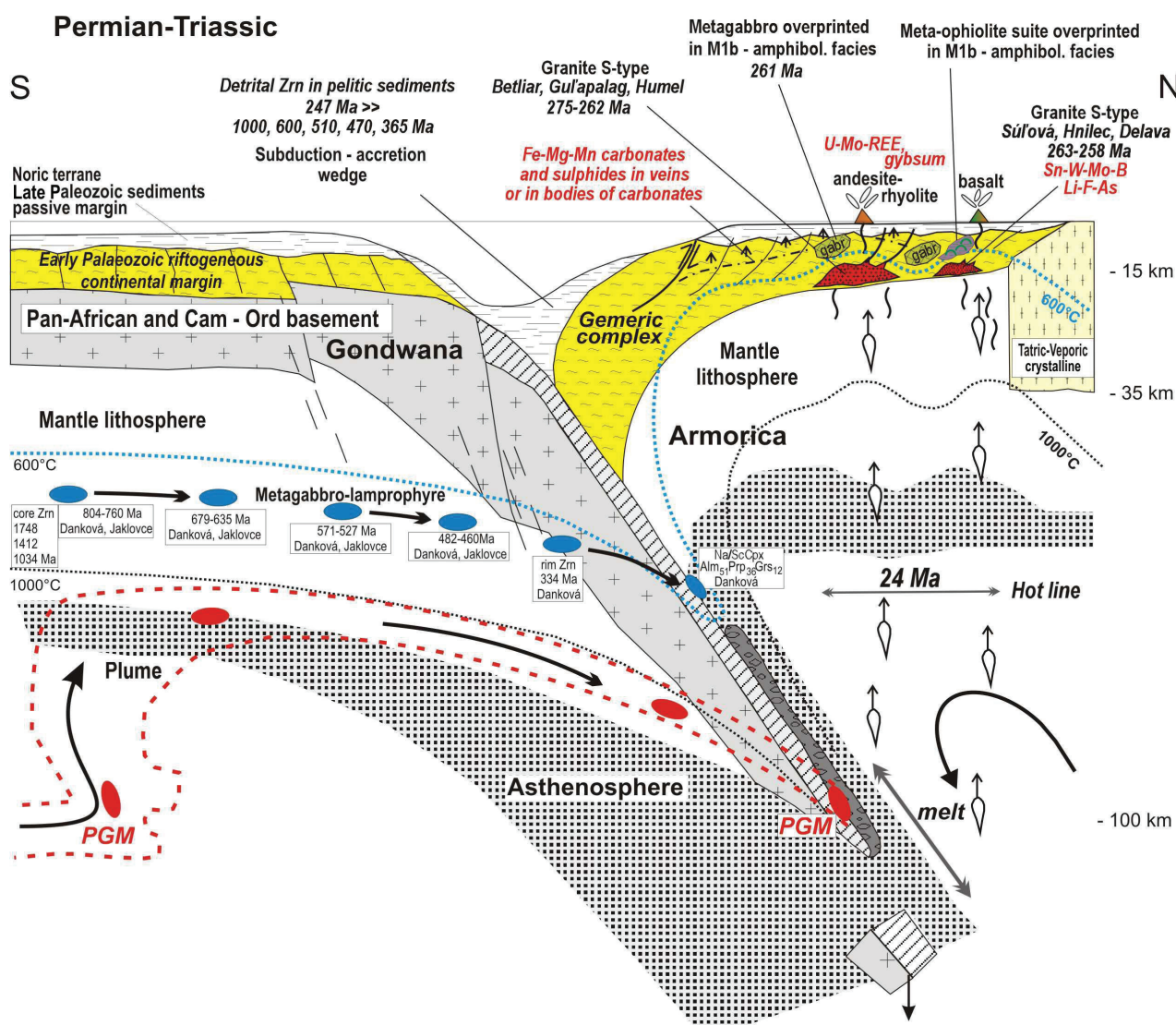


Fig. 5. Model of geotectonic, metallogenetic and lithological evolution in Permian and Triassic. Numbers show the zircon ages. PGM - platinum group minerals.

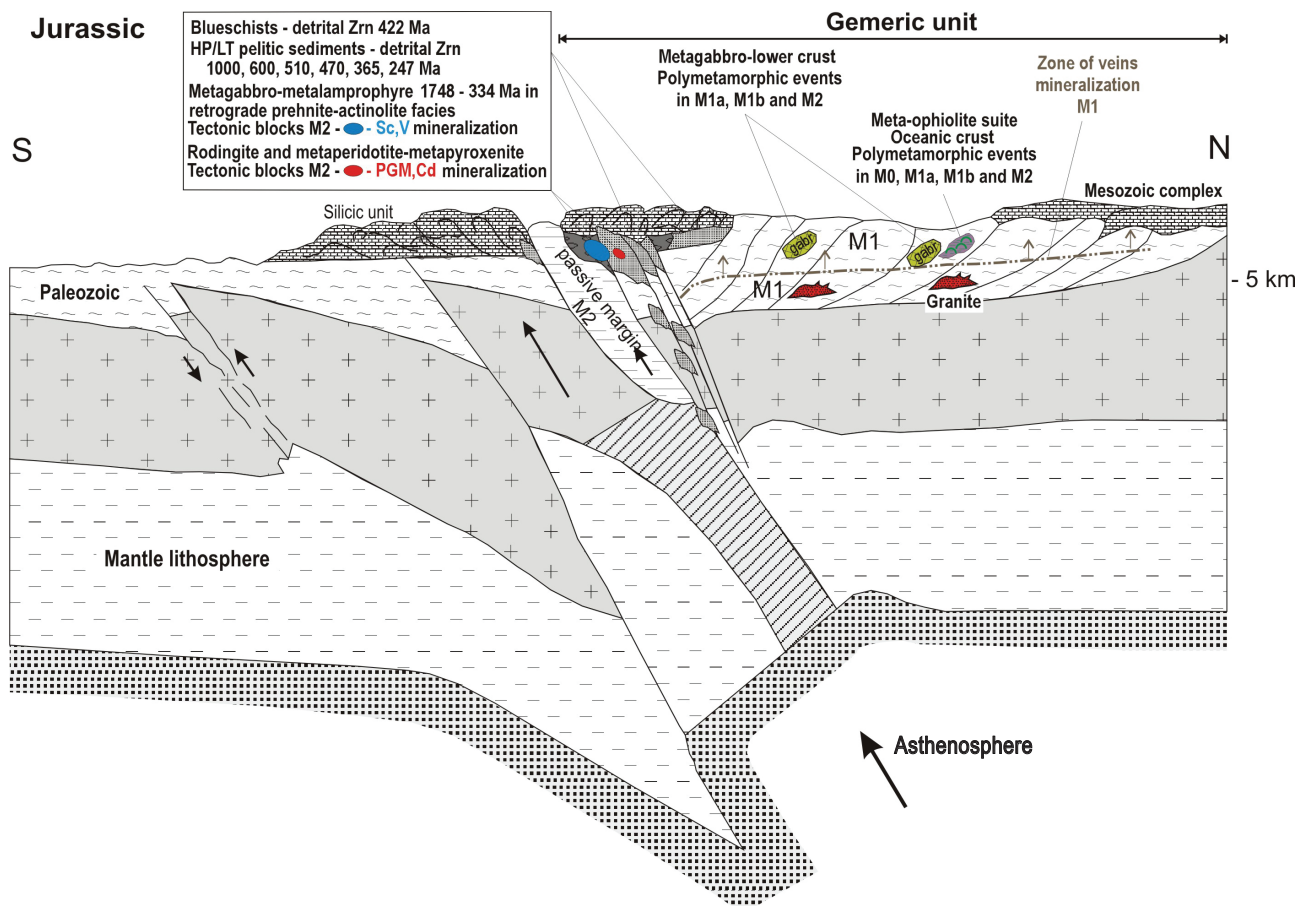


Fig. 6. Model of geotectonic and lithological evolution in Jurassic period.
PGM - platinum group minerals.

ly Paleozoic rhyolites and dacites were in closeness of the hot line again metamorphosed in the epidote-amphibolite facies or in amphibolite facies (M1b). Despite, the relics of older pumpellyite-actinolite facies (M1a), resp. the ocean floor metamorphism M0 have often preserved. The hot lines are characteristic for the island arc metamorphism. In Permian, the main mineralization processes took part there, including the deliberation of fluids prevailingly from the Early Paleozoic rocks (variegated volcanic complex, Holec Beds) and their penetration into extensional tectonic fractures in the cooling zones. There originated prevailingly the siderite-sulphidic vein mineralization, as well as there occurred conditions for the Fe and Mg metasomatism (siderite-ankerite and magnesite bodies) on calcite-limestone protolith, as well as metamorphic overprint of sedimentary and exhalation-sedimentary mineralization in Early Paleozoic formations of the lower and upper ore bearing horizons (Radvanec, 1987; Radvanec et al., 1990; Grecula et al., 1991; Bartalský and Radvanec, 1993; Grecula et al., 1995; Žák et al., 1991; Íro and Radvanec, 1997; Radvanec et al., 2004; Grecula and Radvanec, 2005b; Žák et al., 2005; Jiang Shao-Yong et al., 2006; Radvanec et al., 2010).

In the following period in the area of Permian accretion prism the accretion basin has formed with the sedimentation of the coarse-clastic material (Permian conglomerates), pelites and psammities (Grecula et al., 2009 and 2011). In Triassic, the pelitic sediments in the same continual accretion prism were characterized by the high ratio of quartz and hematite with radiolarites – deep marine trench sediments. At the village of Jaklovce these sediments contain prevailingly detrital zircon with the Early Triassic magmatic age of 247 Ma (Putiš et al., 2011), but also some recycled older zircons of the age 1000-365 Ma (Fig. 5). In the Permian-Triassic lithospheric mantle, on isograde of 600 °C, the metagabbro-metalamprophyre in locality Danková has registered conditions of the eclogite facies with the origin of garnet ($\text{Alm}_{51}\text{Prp}_{36}\text{Grs}_{12}$) and Cr-REE tawmawite (epidote-eclogite facies) from the contact of subducted plate in the depth around 50 km (Radvanec et al., 2009). The age of zircons in this rock in localities Danková and Jaklovce varies from 1748 to 334 Ma (unpublished data set). Various zircon generations have recorded all evolution phases of the Gemicum up to Permian (Fig. 5). In the asthenosphere until Permian-Triassic at high temperatures the platinum group metals (Pd,

Pt, Os, Ir) were transported towards the subducting plate (Radvanec and Uher, 2016).

Alpine geotectonic evolution

The terminating compression and extension of Variscan tectonic processes have finished the Variscan nappe setting of Gemicum and Veporicum, their mutual relations and the beginning of extensional period, connected with the formation of Alpine sedimentary areas of Meliaticum, Silicicum and the Triassic in the North-Gemic zone (Fig. 6). The Jurassic setting of Gemicum was formed in compression regime (Grecula and Radvanec, 2001 in Kobulský et al., 2001). Such setting was conditioned by the reversal movement of lithospheric mantle, and mainly of asthenosphere after its loading by a large amount of subducted material in Permian. The reversal movement of asthenosphere at the beginning of exhumation in Jurassic, encompassing variegated tectonic blocks, has firstly pushed out the metamorphites of M2 HP/LT blueschists facies, glaucophanites, rodingites and at the end also metaperidotites-serpentinites, metalamprophyres, being the bearers of Sc, V, PGM and Cd mineralization from the eclogite facies depth levels. The mantle has squeezed the exhumed tectonic blocks of M2 metamorphites of various protolith by the reversal movement into the prevalingly non-metamorphosed environment of limestones and clastic sediments of Permian-Mesozoic units, originating in the overlier of Variscan accretion complex (and sediments of weakly metamorphosed passive continental margin from the Permian period). Jurassic exhumation phase, recorded by the crystallization of the youngest generation of phengite, was dated by the Ar/Ar and K/Ar method in exhumed blueschists with glaucophane (Dallmeyer et al., 1996; Faryad and Henjes-Kunst, 1997). The rocks of Silicicum are in the area of reversal exhumation of the subducted wedge in the nappe position to Paleozoic basement of Gemicum. In the North-Gemic zone the Mesozoic complexes of the same age are in autochthonous position and their gradual transition to underlying Permian rocks can be observed (Grecula et al., 2009 and 2011).

In the Late Jurassic, but mainly Early Cretaceous, the tectonic arrangement of the rock complexes of Gemicum, i.e. of the products of metamorphic events M0, M1a, M1b and M2 to approximately recent position has terminated.

Conclusion

The recent tectonic setting of Gemicum has originated by the displacements on shear zones in the late-Variscan period. The ocean floor metamorphites M0 were preserved as tectonic blocks of the gneiss-amphibolite complex mainly on the north of Gemicum. Metamor-

phism M1a in the pumpellyite-actinolite facies from the Late Carboniferous was overprinted by the M1b amphibolite facies peak of heat flow at the Late Permian island arc metamorphism. The formation of the Fe-Mn-Mg carbonate and sulphidic vein and stratabound (metasomatic) mineralization, related to M1b metamorphism, has terminated in this period, too.

The presence of exhumed “high-pressure” metamorphosed exotic blocks in the metamorphosed Late Carboniferous of the *mélange* type confirm an unique interpretation of the closure of Paleotethys basin in European Variscides. We do not exclude also the later local penetration of individual blocks of metamorphic rocks prevalingly into the Permian-Triassic sequences. This later exhumation process was of one-shot type and tightly bound on Jurassic reversal movement of the mantle. This process has terminated the exhumation of the high-pressure metamorphic blocks.

At the end of Jurassic or after Jurassic the M2 metamorphism has obtained regional character related to completion of tectonic “rearrangement” of Gemicum. In the post-Jurassic period the M2 metamorphism has reached conditions at the boundary of the middle-pressure greenschists facies. This metamorphism was caused by the final emplacement of the mantle (its upper boundary) beneath the Gemicum, when the isotherm 500 °C becomes stabilized in the depth of 15-20 km, which corresponds to temperature gradient 25 °C/km of Alpine metamorphism.

The regional character of the M2 metamorphism probable has terminated as late as in the Early Cretaceous. It represented the rejuvenation “Alpine metamorphism M2”, in which the rocks of Gemicum in compression regime were metamorphosed again in the middle-pressure (4-5 kbar) greenschists facies conditions. In the older mineral assemblage from the metamorphism M1a and M1b the regional metamorphism M2 was found only locally in shear zones, because the older mineral assemblages of M1a and M1b metamorphism were stable in regional process M2. The metamorphism M2 in Gemicum did not overreach the boundary of the greenschists facies. Metamorphism M2 locally rejuvenated also the vein and stratabound mineralization, because it acted in compressional regime, but the “ore-bearing fluids” have generated only sporadically and without more significant mineralization effects.

It is probable that in Jurassic the mantle beneath Gemicum acquired the recent position, as indicated by the magnetotelluric model (Pawliszynowa, 1978, in Grecula et al., 1995) as well as gravimetric and seismic models (Bezák et al., 1997; Šefara et al., 1996). The shape of lithospheric mantle and asthenosphere beneath Gemicum, as well as metamorphic events of the vein and stratabound mineralization in the last phase of the evolution of Gemicum in Jurassic is schematically visualized in Fig. 6. The configuration of the mantle in the figure, derived from

gravimetric and seismic models has formed owing to the existence of subduction slab from Variscan era, dipping to N. The shape of the mantle in Jurassic-Cretaceous period has initiated the subsequent reversal uplift and exhumation of subducted high-pressure metamorphic rocks and their emplacement into accretion complex.

Acknowledgement

Authors express their thanks to Ministry of Environment of the Slovak Republic for funding several extended regional and metallogenetic projects in the region of Spiš-Gemer Ore Mts., which results were used also in this paper. Prof. Marián Putiš provided perceptive and constructive recommendations to improve the manuscript, which we greatly appreciate. Published material is also a contribution for the EU project MINATURA 2020, defining the geodynamic background of metallogenetic processes in the Spiš-Gemer Ore Mts., which principally contributed to origin of the mineral wealth of this region.

References

- BARTALSKÝ, B. & RADVANEC, M., 1993: Relations between minerals of the Fe-Zn-As-S and Fe- Ti-Mn-O element association in conditions of regional metamorphism, Rožňava-Turecká Ore Field, Spiš-Gemer Ore Mts., Eastern Slovakia. *Miner. slov.*, 25, 437 – 450.
- BEZÁK, V., ŠEFARA, J., BIELIK, M. & KUBEŠ, P., 1997: Models of the Western Carpathian lithosphere. In: GRECULA, P., HOVORKA, D. & PUTIŠ, M. (eds.): Geological evolution of the Western Carpathians. *Bratislava, Miner. slov. – Monogr.*, 25 – 34.
- DALLMEYER, R. D., NEUBAUER, F., HANDLER, R., FRITZ, H., MÜLLER, W., PANA, D. & PUTIŠ, M., 1996: Tectonothermal evolution of the internal Alps and Carpathians: Evidence from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ mineral and whole-rock data. *Eclogae geol. Helv.*, 89, 203 – 227.
- FARYAD, S. W. & HENJES-KUNST, F., 1997: Petrologic and geochronologic constraints on the tectonometamorphic evolution of the Meliata Unit blueschists, Western Carpathians (Slovakia). In: GRECULA, P., HOVORKA, D. & PUTIŠ, M. (eds.): Geological evolution of the Western Carpathians. *Bratislava, Miner. slov. – Monogr.*, 145 – 154.
- GRECULA, M., 1998: Carboniferous of Črmelicum terrane, Western Carpathians: Relic of a fore-arc basin within Alpine Variscides. *Miner. slov.*, 2, 109 – 136.
- GRECULA, P., 1973: The homeland of the Gemic and its metallogenesis. *Miner. slov.*, 5, 221 – 245.
- GRECULA, P., 1982: Gemicum – segment of the Paleotethyan riftogenous basin. *Miner. slov. – Monogr. Bratislava, Alfa*, 1 – 263.
- GRECULA, P., RADVANEC, M. & BARTALSKÝ, B., 1991: Critical thermic isograds in metamorphic-hydrothermal model of vein mineralization on the background of the Variscan events, Gemic unit, Western Carpathians. *Miner. slov.*, 23, 403 – 411.
- GRECULA, P., ABONYI, A., ABONYIOVÁ, M., ANTAŠ, J., BARTALSKÝ, B., BARTALSKÝ, J., DIANIŠKA, I., DRNÍK, E., ĎUĐA, R., GARGULÁK, M., GAZDAČKO, E., HUDÁČEK, J., KOBULSKÝ, J., LÖRINZ, L., MACKO, J., NÁVESNÁK, D., NÉMETH, Z., NOVOTNÝ, L., RADVANEC, M., ROJKOVIČ, L., ROZLOŽNÍK, O., VARČEK, C. & ZLOCHA, J., 1995: Mineral deposits of the Slovak Ore Mountains. *Bratislava, Miner. slov. – Monogr.*, 1 – 834.
- GRECULA, P. & RADVANEC, M., 2001: Geotektonic model of Gemicum. In: Kobulský, J. (ed.): Final report of the project: Atlas of geomaps of SGR. *Manuscript. Bratislava, archive St. Geol. Inst. D. Štúr.*
- GRECULA, P. & RADVANEC, M., 2005a: Geotectonic model of Gemicum. *Miner. slov.*, 37, 193 – 198.
- GRECULA, P. & RADVANEC, M., 2005b: Age of vein siderite-sulphide mineralization in Gemicum: Variscan or Alpine? *Miner. slov.*, 37, 343 – 345.
- GRECULA, P., KOBULSKÝ, J., GAZDAČKO, E., NÉMETH, Z., HRAŠKO, E., NOVOTNÝ, L. & MAGLAY, J., 2009: Geological map of the Spiš-Gemer Ore Mts. 1 : 50 000. *Bratislava, St. Geol. Inst. D. Štúr.*
- GRECULA, P., KOBULSKÝ, J., GAZDAČKO, E., NÉMETH, Z., HRAŠKO, E., NOVOTNÝ, L., MAGLAY, J., PRAMUKA, S., RADVANEC, M., KUCHARIČ, E., BAJTOŠ, P. & ZÁHOROVÁ, E., 2011: Explanations to geological map of the Spiš-Gemer Ore Mts. 1 : 50 000. *Bratislava, St. Geol. Inst. D. Štúr. In Slovak.*
- ÍRO, S. & RADVANEC, M., 1997: Chemical and mineralogical research of carbonate minerals at Nižná Slaná – Mano Deposit (Gemicum, Western Carpathians). *Acta geol. geogr. Univ. Comen., Geol.*, 52, 19 – 28.
- JIANG, S. Y., RADVANEC, M., NAKAMURA, M., PALMER, M., KOBAYASHI, K., ZHAO, H. X. & KUI, D. Z., 2008: Chemical and boron isotopic variations of tourmaline in the Hnilec granite-related hydrothermal system, Slovakia: Constrains on magmatic and metamorphic fluid evolution. *Lithos*, 106 (1 – 2), 1 – 11.
- KOBULSKÝ, J., 2001: Final report of the project: Atlas of geomaps of SGR. *Manuscript. Bratislava, archive St. Geol. Inst. D. Štúr.*
- NÉMETH, Z., 2002: Variscan suture zone in Gemicum: Contribution to reconstruction of geodynamic evolution and metallogenetic events. *Slovak Geol. Mag.*, 8, 247 – 257.
- PAWLISZYNOWA, J., 1978: Magnetotelkuric method. In: Report on geophysical measurements, Poproč area. *Manuscript. Spišská Nová Ves, archive GP*, 189.
- PLAŠIENKA, D., GRECULA, P., PUTIŠ, M., KOVÁČ, M. & HOVORKA, D., 1997: Evolution and structure of the Western Carpathians: An overview. In: Grecula, P., Hovorka, D. & Putiš, M. (eds.): Geological evolution of the Western Carpathians. *Bratislava, Miner. slov. – Monogr.*, 1 – 24.
- PUTIŠ, M., IVAN, P., KOHÚT, M., SPIŠIAK, J., SIMAN, P., RADVANEC, M., UHER, P., SERGEEV, S., LARIONOV, A., MÉRES, Š., DEMKO, R. & ONDREJKA, M., 2009: Metagneous rocks of the West-Carpathian basement, Slovakia: Indicators of Early Paleozoic extension and shortening events. *Bull. Soc. géol. France*, 180, 6, 461 – 471.
- PUTIŠ, M., RADVANEC, M., SERGEEV, S., KOLLER, F., MICHÁLEK, M., SNÁRSKA, B., KOPPA, M., ŠARINOVÁ, K. & NÉMETH, Z., 2011: Metamorphosed succession of cherty shales with basalt and diastrophic breccia in olistolith of the Meliatic Jurassic accretion wedge near Jaklovce (Slovakia), dated on zircon (U-Pb SIMS SHRIMP). *Miner. slov.*, 43, 1 – 18.

- RADVANEČ, M., 1987: The generation of ore fluids in the process of regional metamorphism. *Miner. slov.*, 19, 561 – 573.
- RADVANEČ, M. & BARTALSKÝ, B., 1987: Geochemical zoning of stratiform sulphide ore mineralization in the Smolník – Štós – Medzev area, Eastern Slovakia. *Miner. slov.*, 19, 443 – 445.
- RADVANEČ, M., 1998: High-pressure metamorphism of Upper Carboniferous conglomerate from the Rudňany-Svinský hrb locality in the northern Gemericum. *Miner. slov.*, 30, 95 – 108.
- RADVANEČ, M., 1999: Eclogitized clinopyroxene-gabbro with retrograde metamorphism in pumpellyite-actinolite facies on Babiná and Ostrá hills (Gemicum). *Miner. slov.*, 31, 467 – 484.
- RADVANEČ, M. & GREČULA, P., 1985: Geochemical anomalies of tin and molybdenum in the ore-bearing volcanic horizon of the Gemic Lower Paleozoic sequences (West Carpathians). *Miner. slov.*, 17, 6, 563 – 568.
- RADVANEČ, M. & BARTALSKÝ, B., 1988: Influence of metamorphism on the Fe-Zn-As-S system in stratiform sulphidic mineralization of the Early Paleozoic of Gemicum, Eastern Slovakia. *Miner. slov.*, 20, 307 – 322.
- RADVANEČ, M., ŽÁK, K. & GREČULA, P., 1990: Isotopic ratio of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in the baryte of Gemicum. *Miner. slov.*, 22, 219 – 224.
- RADVANEČ, M., GREČULA, P., NÁVESNÁK, D. & KOBULSKÝ, J., 1993: Zonality of submarine exhalative mineralization in Lower Paleozoicum near Mníšek nad Hnilcom and Prakovce, Gemic unit, Western Carpathians. *Miner. slov.*, 25, 249 – 262.
- RADVANEČ, M., GREČULA, P. & ŽÁK, K., 2004: Siderite mineralization of the Gemicum Superunit (Western Carpathians, Slovakia): A revised genetic model. In: Metamorphic processes in ore formation and transformation: A thematic series of paper. *Ore Geol. Rev.*, 24, 3 – 4, 267 – 298.
- RADVANEČ, M., 2005: Prehnite-pyroxenite from the Danková locality. *Miner. slov.*, 37, 353 – 357.
- RADVANEČ, M., SERGEEV, S., PUTIŠ, M. & LARIONOV, A., 2009: REE-rich chromitawmawite and majoritic garnet bearing pale spheric fragment enclosed in meta-peridotite (Gemic area, Western Carpathians): Zircon dating of UHP metamorphism and long-lasting mantle convection. *IEC 8, Xining-Qinghai Province, China*, 118 – 119.
- RADVANEČ, M., NÉMETH, Z. & BAJTOŠ, P., 2010: Magnesite and talc in Slovakia: Genetic and geoenvironmental models. Monogr. Bratislava, St. Geol. Inst. D. Štúr, 1 – 130.
- RADVANEČ, M. & UHER, P., 2016: Platinum-group minerals in metapyroxenite from Jasov, Meliatic Unit, Slovakia. *Acta geol. Slov.*, 8, 3, 173 – 179.
- ŠEFARA, J., BIELIK, M., KONEČNÝ, P., BEZÁK, V. & HURAI, V., 1996: The latest stage of development of the Western Carpathian lithosphere and its interaction with asthenosphere. *Geol. Carpath.*, 47, 6, 339 – 347.
- ŽÁK, K., RADVANEČ, M., BARTALSKÝ, B. & GREČULA, P., 1991: S, C, O, Sr isotopes and a metamorphic-hydrothermal model of the vein mineralization; Gemic unit, Western Carpathians. *Miner. slov.*, 23, 95 – 108.
- ŽÁK, K., RADVANEČ, M. & GREČULA, P., 2005: Siderite mineralization of the Gemicum Superunit (Western Carpathians, Slovakia): Review and revised genetic model (*Ore Geol. Rev.*, 24, 267 – 298) – a reply. *Ore Geol. Rev.*, 26, 173 – 180.

Geotektonický a metalogenetický vývoj gemerika od ordoviku po juru

Gemicum vo vývojovej aj deformačnej etape variskej éry zaznamenalo niekoľko významných udalostí. Tie sa podľa záznamov v sedimentárnych a magmatických sekvenciách paleozoika, odlišností súborov tektonických deformácií, metamorfných udalostí v čase a odlišných genetických typov mineralizácie prvý raz zhodnotili v geotektonickom modeli vývoja gemerika ako spojitý udalosti od ordoviku po juru (Grečula a Radvanec, 2005a). Východiskové práce Grečulu (1982), ako aj Radvanca (1998), Grečulu (1998), Grečulu et al. (1995), Kobulského (2001), Grečulu a Radvanca (in Kobulský, 2004) a Németha (2002) boli podkladom tohto ordovicko-jurského modelu. Terénne technické práce pri hľadaní a overovaní ložísk nerastných surovín potvrdili litostratigrafické členenie staršieho paleozoika a boli východiskom pri stanovovaní sukcesie sedimentárnych, magmatických a tektonických udalostí a tým aj pri celkovej geotektonickej interpretácii paleotektonického vývoja gemerika (Grečula, 1982; Grečula et al., 1995).

V tejto štúdii vychádzame z podrobného geologického mapovania celého gemerika, t. j. geologickej mapy, dôkladného litologického poznania paleozoických sekvencií,

ako aj z ich metamorfného a tektonického prepracovania (Grečula et al., 2009). Uvedený genetický model dopĺňame o geochronologické údaje (Putiš et al., 2009; Radvanec et al., 2009 a 2010).

Metalogenetický vývoj gemerika je neoddeliteľne spojený s geotektonickým vývojom gemerika v čase a odvodený od neho (Grečula et al., 1995). Najstaršia stratiformná sulfidická mineralizácia je viazaná na staropaleozoický oceánsky rift s bimodálnym bazaltovo-keratofýrovým vulkanizmom (Radvanec a Bartalský, 1987, 1988; Radvanec a Grečula, 1985; Radvanec et al., 1993; Grečula et al., 1995) a mladšie, variské metalogenetické udalosti sú úzko späté s metamorfózou (Fe-, Mn- a Mg-karbonátová a sulfidická mineralizácia) a s anatektickým tavením (granit typu S, Sn, Mo, W, B a Li mineralizácia) v období od vrchného karbónu po vrchný perm (Radvanec, 1987; Radvanec et al., 1990; Grečula et al., 1991; Bartalský a Radvanec, 1993; Grečula et al., 1995; Žák et al., 1991; Ľro a Radvanec, 1997; Radvanec et al., 2004; Grečula a Radvanec, 2005b; Žák et al., 2005; Jiang Shao-Yong et al., 2006; Radvanec et al., 2010). Na vulkanický ekvivalent granitu typu S sa viaže U-Mo-REE mineralizácia v perme (Grečula

la et al., 1995). Mineralizácie platínovej skupiny (PGM), Sc, Cd a V sú viazané v metapyroxenite, prehnit-pyroxenite (metalamprofyre), rodingite a serpentinite, ktorý bol exhumovaný v jure spolu s modrými bridlicami (Radvanec a Uher, 2016; Radvanec, 2005).

Vývojové riftogénne etapy staršieho paleozoika od vrchného ordoviku po spodný karbón

Staropaleozoický vývoj gemerika pokladáme za riftogénny od vrchného ordoviku po spodný karbón ako súčasť Paleotetidy. Sedimentačný priestor, ktorý podrobne opísali Grecula (1982 a 1995) a Grecula et al. (2009 a 2011) a ktorého geotektonickú pozíciu už tiež znázornili (Grecula, 1973; Grecula a Radvanec, 2005), sa najprv vyvíjal okolo tvoriaceho sa riftu na kontinentálnej platni. Tou bol severný okraj Gondwany. Predriftové štádium v ordoviku je datované zirkónmi v rozsahu od 482 do 458 mil. rokov a charakterizuje ho ryolit, dacit a klinopyroxenické (Cpx) gabro vo všetkých čiastkových variských príkrovoch gemerika (Putiš et al., 2009; Grecula et al., 2009 a 2011). Na lokalitách Ostrá, Babiná, Šajby a Dobšinský potok na severe gemerika a na lokalitách Lastovičí vrch a Zadné Porče na juhu gemerika gabro obsahuje magmatický diopsid (do 2,5 cm), Mg-chromit, Sr-epidot, albit a i. Sr-epidot a albit vznikli z rozpadu pôvodného Sr-plagioklasu v procese následnej poordovickej polymetamorfózy (Radvanec, 1999 a 2000). Cpx gabro má geochemické charakteristiky spodnej kôry (obr. 1).

Počiatok rapidnej riftogenézy – druhá etapa riftingu – v staršom paleozoiku gemerika na základe údajov o nálezoch sporomorf, akritárch a rádiolárií z vrchnej časti spodnej litostratigrafickej jednotky gemerika – holeckých vrstiev – indikuje silúrsky alebo vrchnosilúrsky až spodnodevónsky vek. Toto obdobie znamená pokročilejšiu riftogenézu s tvorbou anoxických panví, so vznikom lyditov a čiernych pelitov (holecké vrstvy) a s prvými prejavmi vulkanickej činnosti hlavne v ich nadloží v podobe výlevov vulkanických produktov s bimodálnym bazalto-keratofýrovým zložením (Grecula et al., 2009 a 2011). Tieto vulkanické výlevy sprevádzal vznik stratiformnej sulfidickej mineralizácie typu Smolník, kde prevláda Fe >> nad Cu > a Zn (pyrit nad chalkopyritom a sfaleritom) a v keratofyre sa zistila asociácia Ba + Mo + Sn (Radvanec a Bartalský, 1987, 1988; Radvanec a Grecula, 1985; Radvanec et al., 1993; Grecula et al., 1995). Druhé obdobie riftogenézy od vrchného silúru po spodný devón s typickými sedimentárnymi faciami sa považuje za prvý geotektonicko-sedimentačný megacyklus gemerického komplexu so vznikom betliarskej formácie, holeckých vrstiev s vápencami a smolníckeho súvrstvia (Grecula et al., 2009 a 2011; obr. 2).

Hlavná etapa riftingu (obr. 3) pokračovala vo vrchnom devóne až do spodného karbónu najprv bimodálnym vul-

kanizmom a v závere bazaltovým vulkanizmom (Grecula et al., 2009 a 2011). Tieto geotektonické udalosti spôsobili výrazné členenie sedimentačného priestoru s veľmi pestrým faciálnym vývojom klastických sedimentov (smolnícke súvrstvie), ktoré charakterizujú paleogeografické podmienky vzniku a ich pozíciu v sedimentačnom priestore riftu na kontinentálnej kôre. Horninové súbory patriace k týmto faciám sú také charakteristické, že ich možno spoľahlivo priestorovo vymedziť a spolu s ostatnými horninami zaradiť aj do samostatných litostratigrafických a tektonických jednotiek. Tretia hlavná etapa riftingu už ohraničila osovú časť panvy. Jej začiatok bol vo vrchnom silúre alebo až v spodnom devóne (obr. 2) a obdobie medzi 1. a 2. riftingom by mohlo zabrať spodný a stredný devón.

Začiatok tretej etapy riftingu (obr. 3) reprezentuje vrchný bimodálny vulkanický komplex v podobe výlevu bazaltu a ryolitu. Túto vulkanickú aktivitu sprevádza stratiformná sulfidická mineralizácia typu Mníšek nad Hnilcom, kde prevláda Fe nad Cu, Zn, Pb, Zn, Ag a As a pyrit nad chalkopyritom, galenitom a sfaleritom (Grecula et al., 1995). V centrálnej časti riftu vznikol stredooceánsky chrbát s postupne sa rozširujúcim oceánskym typom kôry a na nej vznikali horniny časti dnešného rakoveckého komplexu (príkrovu; Grecula et al., 2009 a 2011). V oblasti výstupu plášťovej astenosféry sa metamorfovali predtým vzniknuté horninové komplexy v oblasti oceánskeho chrbta na amfibolit a rulu. Túto metamorfózu na oceánskom dne charakterizuje vysoká teplota a nízky tlak, je to HT/LP metamorfóza M0. V tejto oblasti riftu vznikol plagiogranit s hornblendom, K-živcom, albitom, muskovitom a biotitom. Podľa Rb-Sr izochróny z týchto minerálov je vek plagiogranitu 371 ± 4 mil. rokov a vek chladnutia hornblendu je 362 mil. rokov. Tieto údaje sú v dobrej zhode s vekom zirkónu z rulovo-amfibolitového komplexu, ktorý je v rozsahu od 385 do 342 mil. rokov (Putiš et al., 2009). Hlavnú etapu riftu v období vrchného devónu až spodného karbónu reprezentuje kompletná ofiolitová suita: serpentinit/metaperidotity, Cpx gabrá s plagioklasom a chromitom a rulovo-amfibolitový komplex na lokalitách Dobšiná, Delava, Rudňany, Jaklovce, Strážny vrch a Klátov na severe, ale aj na juhu gemerika (serpentinit, Strážny vrch). Horniny ofiolitovej suity sú vždy tektonicky obmedzené oproti svojmu okoliu. Normalizácia chemického zloženia vzoriek amfibolitového komplexu a metagabier (ofiolitovej suity) je v dobrej zhode z oceánskou kôrou (obr. 3). Serpentinity z Klátova a Strážneho vrchu majú komatiitový charakter. V ostatných častiach panvy na kontinentálnej kôre pokračovala klastická sedimentácia s prejavmi lokálneho ryolitového vulkanizmu. Tretia etapa riftingu doviedla paleogeografiu sedimentačnej oblasti staršieho paleozoika a tým aj charakteristické faciálne vývoje najvyššej litostratigrafickej jednotky – hnileckého súvrstvia – a súčasne aj vývojovú etapu staršieho paleozoika (Grecula et al., 2009 a 2011).

Mladopaleozoické etapy konvergentných variských udalostí

Nasledujúca etapa variského cyklu sa pravdepodobne začala už na hranici devón/karbón. Sedimenty vrchného visénu, doložené paleontologicky, ležia na zvrásnenom a metamorfovanom podloží staršieho paleozoika. V spodnom a strednom karbone bola ďalšia deformačná etapa staropaleozoických komplexov **s nástupom subdukčných procesov**. V tomto období sa vytvoril akrečný bazén so sedimentáciou hruboklastického materiálu pochádzajúceho zo staropaleozoických hornín prevažne oceánskeho chrbta, ale aj granitov-tonalitov (Radvanec, 1998). Časť týchto hrubých klastík (napr. aj rudniansky zlepenčový typ) bola strhávaná do subdukčného kanála spolu s ostatnými horninami (obr. 4). Skracovanie sedimentačného priestoru prešlo vo vrchnom karbone do obdukcie a tvorby variských príkrovov.

Hlavné množstvo hornín stredoocéánskeho chrbta (ofiolitová suita) a okolitých sedimentov obdukovalo. Takto vznikli násuny a prešmyky akrečného komplexu vo forme príkrovov na severnú kontinentálnu platňu (obr. 4). Vznikli variské príkrovy v takomto poradí z juhu na sever: medzevský, jedľovecký, humelský, prakovský, mnišský, kojšovský a rakovecký (Grecula et al., 2009 a 2011). Charakteristická metamorfóza tejto kompresie/obdukcie a začínajúcej sa subdukcie je M1a – pumpellyitovo-aktinolitová fácia. Pre horniny ofiolitovej suity, ktoré boli metamorfované v oceánskej kôre M0 (HT/LP – amfibolitová a epidotovo-amfibolitová fácia), je charakteristická M1a retrográdna a kompresná metamorfóza, rovnako ako pre exhumované Cpx gabrá zo spodnej kôry (lokalita: Babiná, Ostrá, Šajby, Dobšínsky potok, Lastovičí vrch, Zadné Porče) s jadeitom, omfacitom, Sr-epidotom a albitom. Tieto gabrá boli vo vrchnom karbone (313 mil. rokov) exhumované z hĺbky eklogitovej fácie na izograde 600 °C (Babiná, Ostrá), resp. z hĺbky modrých bridlic (Šajby) do M1a – pumpellyitovo-aktinolitovej fácie (Radvanec, 1999 a 2000).

Vo vrchnom karbone (obr. 4) pokračovali procesy začínajúcej sa subdukcie, ako aj približovania konvergujúcich platní Gondwany a Armoriky a zdvihu astenosféry v podloží aktívnej platne. Zo subdukčného kanála sa časť predtým subdukovaného materiálu vracala späť vrátane rudnianskych zlepenčov (Radvanec, 1998) spolu s uvedenými tektonickými blokmi Cpx-Sr metagabra zo spodnej kôry (Radvanec, 1999 a 2000). Pri zdvihu astenosféry pod aktívnou platňou stúpala aj teplota. Predpokladá sa, že 600-stupňový izográd v tomto štádiu už dosahoval vrchnú časť kontinentálnej kôry a zodpovedal tak podmienkam gradientu kontinentálneho orogénneho pásma, teda regionálnej metamorfózy. Vo veporických komplexoch na tomto izograde vznikla anatektická tavenina, resp. granitovo-tonalitová tavenina (340 – 290 mil. rokov), ktorá

bola následne umiestnená vo veporickom komplexe hornín (obr. 4).

V perme a triase variské subdukčné procesy vyvrcholili vývojom ostrovného oblúka, ryolitovým, andezitovým a bazaltovým vulkanizmom a granitovým magmatizmom (obr. 5). Vznikli anatektické S-typové granity s Sn-W-Mo-B-Li-F-As mineralizáciou v ich bezprostrednom okolí. V okolí permských vulkanitov, blízko povrchu a na povrchu to bola U-Mo-REE mineralizácia a ložiská sadrovca/anhydritu (Grecula et al., 1995). V oblasti geotermického gradientu okolo horúcich línií prebiehali strednotlakové metamorfné udalosti v epidotovo-amfibolitovej alebo amfibolitovej fáci (M1b). Mnohé tektonické bloky Cpx gabier so Sr-epidotom, bloky ofiolitovej suity, staropaleozoické ryolity a dacity boli v blízkosti horúcej línie znovu metamorfované v epidotovo-amfibolitovej alebo amfibolitovej fáci (M1b), pričom reliktly staršej, pumpellyitovo-aktinolitovej fácie (M1a), resp. metamorfózy oceánskeho dna M0 sa často zachovali. Horúce línie sú charakteristické pre metamorfózu ostrovného oblúka. V perme prebiehali hlavné etapy mineralizácie, t. j. generovanie fluíd predovšetkým zo staropaleozoických hornín (pestrý vulkanický komplex, holecké vrstvy) a ich prenos v etape kompresného ochabnutia do tektonických tenzných fraktúr. Vznikla prevažne sideritová žilná, sideritovo-sulfidická mineralizácia, ako aj podmienky na metasomatické procesy (Fe a Mg metasomatóza, siderit-ankerit a magnezit) na kalcitovo-vápencovom protolite a na metamorfné prepracovanie sedimentárneho a exhalčno-sedimentárneho zrudnenia v staropaleozoických súvrstviach spodného a vrchného rudonosného horizontu (Radvanec, 1987; Radvanec et al., 1990; Grecula et al., 1991; Bartalský a Radvanec, 1993; Grecula et al., 1995; Žák et al., 1991; Íro a Radvanec, 1997; Radvanec et al., 2004; Grecula a Radvanec, 2005b; Žák et al., 2005; Jiang Shao-Yong et al., 2006; Radvanec et al., 2010).

V ďalšom období sa v oblasti permskej akrečnej prizmy vytvoril akrečný bazén so sedimentáciou hruboklastického materiálu (permské zlepence), pelitov a psamitov (Grecula et al., 2009 a 2011). Pelitické sedimenty v tej istej a neprerušenej akrečnej prizme v triase charakterizuje vysoký podiel kremeňa a hematitu s rádiolármi – hlbokomorské trenčové sedimenty. Pri Jaklovciach tieto sedimenty obsahujú prevažne detritický zirkón spodnotriasového magmatického veku 247 mil. rokov (Putiš et al., 2011), ale aj staršie recyklované zirkóny veku od 1 000 do 365 mil. rokov (obr. 5). Metagabro-metalamprofýr z lokality Danková, pochádzajúci z litosférického plášťa z obdobia permu až triasu, zaznamenal na kontakte subdukujúcej dosky v hĺbke okolo 50 km (Radvanec et al., 2009) na izograde 600 °C v podmienkach eklogitovej fácie vznik granátu ($\text{Alm}_{51}\text{Prp}_{36}\text{Grs}_{12}$) a Cr-REE tawmawitu (epidotovo-eklogitová fácia).

Vek zirkónov v tejto hornine na lokalite Danková a Jaklovce je variabilný, od 1 748 do 334 mil. rokov (ne-

publikované údaje), pričom rôzne generácie zirkónu znamenali všetky vývojové etapy gemerického komplexu do permu (obr. 5). V astenosfére boli v období do permu až triasu transportované k subdukčnej doske pri vysokej teplote kovy platinovej skupiny (Pd, Pt, Os, Ir) (Radvanec a Uher, 2016).

Alpínske etapy geotektonického vývoja

Doznievajúce kompresné a extenzné variské tektonické procesy dokončili variskú prikrývovú stavbu gemerika a veporika, ich vzájomné vzťahy a začiatok extenzného obdobia spätého s tvorbou alpínskych sedimentačných priestorov meliatika, silicika a severogemerického triasu (obr. 6). Jurské usporiadanie gemerika bolo v kompresnom režime (Grecula a Radvanec in Kobulský et al., 2001). Takéto usporiadanie podmienil reverzný pohyb litosférického plášťa, a hlavne astenosféry po jej zaťažení významným objemom subdukujúceho materiálu v perme. Reverzný pohyb astenosféry na začiatku exhumácie v jure vo forme pestrých tektonických blokov najskôr vytlačil metamorfity M2 vysokotlakovej a nízkoteplotnej fácie modrých bridlíc, glaukofanitov a rodingitov a na jej konci aj metaperidotity-serpentinity a metalamprofýry, ktoré sú nositeľom Sc, V PGM a Cd mineralizácie z hĺbky okolo eklogitovej fácie. Tektonické bloky metamorfítov M2 z rôzneho protolitu exhumujúce plášť reverzným pohybom vrazil prevažne do nemetamorfovaného prostredia vápencov a klastických sedimentov permsko-mezozoických jednotiek vzniknutých v nadloží variského akrečného komplexu (a sedimentov slabo metamorfovaného pasívneho okraja kontinentu z permského obdobia). Jurské exhumáčné štádium kryštalizácie najmladšej generácie fengitu pomocou Ar/Ar a K/Ar datovania v exhumovaných modrých bridliciach s glaukofanom doložili Dallmeyer et al. (1996) a Farayad a Henjes-Kunst (1997). Horniny silicika sú v oblasti reverznej exhumácie subdukovaného klina v prikrývovej pozícii k paleozoickému podkladu gemerika. Na S od gemerika sú rovnako staré mezozoické komplexy v pozícii in situ a možno tam sledovať ich plynulý prechod do podložitých hornín permu (Grecula et al., 2009 a 2011).

Vo vrchnej jure, ale najmä v spodnej kriede sa tektonické usporadúvanie horninových komplexov gemerika, a teda aj produktov metamorfných udalostí M0, M1a M1b a M2 do približne súčasnej pozície skončilo.

Záver

Terajší tektonický obraz gemerika vznikol pohybmi na strižných zónach v neskorovariskom období. Metamorfity oceánskeho dna M0 sa zachovali v podobe tektonických blokov rulovo-amfibolitového komplexu hlavne na S gemerika. Metamorfóza M1a v pumpellyitovo-aktino-

litovej fácií vrchného kARBónu bola prepísaná teplotným vrcholom amfibolitovej fácie pri regionálnej termálnej metamorfóze vo vrchnom perme a M1b. V tomto štádiu metamorfózy M1b (metamorfóza ostrovného oblúka) sa skončila aj tvorba Fe-Mn-Mg karbonátovej a sulfidickej žilnej a stratiformnej karbonátovej (metasomatickej) mineralizácie.

Vzťah exhumovaných, „vysokotlakovo“ metamorfovaných exotických blokov v metamorfovanom vrchnom kARBÓne typu melanže je ojedinelým príkladom uzatvorenia paleotetýdneho bazéna v európskych variscidách. Nevylučujeme lokálny prienik metamorfítov prevažne do permsko-triasových sekvencií. Tento exhumáčny proces bol jednorazový a úzko sa viazal na reverzný pohyb plášťa v jure. Ním sa exhumácia vysokotlakovo metamorfovaných blokov aj skončila.

Koncom jury alebo až po nej nadobudla metamorfóza M2 regionálny charakter súvisiaci s tektonickým dokončením usporiadania gemerika. V pojurskom období mala metamorfóza M2 regionálnu povahu na hranici strednotlakovej metamorfózy vo fácií zelených bridlíc. Túto metamorfózu spôsobilo finálne umiestnenie (vrchnej hranice) plášťa pod gemerikom, keď sa izoterma 500 °C ustálila v hĺbke 15 – 20 km, čo zodpovedá teplotnému gradientu 25 °C/km alpínskej metamorfózy.

Regionálny charakter metamorfózy M2 pravdepodobne doznieval až v spodnej kriede. Bola to rejuvenizačná „alpínska metamorfóza M2“, v ktorej sa horniny gemerika v kompresnom režime opäť metamorfovali v podmienkach strednotlakovej (4 – 5 kbar) fácie zelených bridlíc. V staršej minerálnej asociácii z metamorfózy M1a a M1b sa regionálna metamorfóza M2 zistila len lokálne v strižných zónach, pretože staršie minerálne asociácie z M1a a M1b boli v regionálnom procese M2 stabilné. Metamorfóza M2 v gemeriku neprekročila hranicu fácie zelených bridlíc. Lokálne prepracovala aj žilnú a stratiformnú mineralizáciu, lebo prebiehala v kompresnom režime, ale „rudonosné fluidá“ sa generovali len sporadicky a bez významného mineralizačného efektu.

Je pravdepodobné, že v jure sa plášť pod gemerikom dostal do súčasnej pozície, ako to vyplýva napr. z magnetotelurického (Pawliszynowa, 1978; Grecula et al., 1995) a gravimetrického aj seizmického modelu (Šefara et al., 1996; Bezák et al., 1997). Tvar litosférického plášťa a astenosféry pod gemerikom, ako aj metamorfné udalosti žilnej pozície a stratiformnej mineralizácie v poslednom štádiu vývoja gemerika v jure schematicky znázorňuje obr. 6. Konfigurácia plášťa na obrázku, odvodená z gravimetrických a seizmických modelov, sa sformovala pod vplyvom subdukčného kanála z variského obdobia so sklonom na S. Tvar plášťa v jursko-kriedovom období podmienil nasledujúci reverzný zdvih a exhumáciu subdukovaných, vysokotlakovo metamorfovaných hornín a ich umiestnenie do akrečného komplexu.

Pod'akovanie

Autori ďakujú Ministerstvu životného prostredia Slovenskej republiky za financovanie viacerých rozsiahlych projektov v regióne Spišsko-gemerského rudohoria, na výsledkoch ktorých je postavený aj tento článok. Profesorovi M. Putišovi ďakujeme za konštruktívne pripomienky, ktoré sme akceptovali, a prispeli sme tým k zlepšeniu pôvodného manuskriptu. Publikovaný

materiál je aj príspevkom k projektu EÚ *MINATURA 2020* a je zameraný na definovanie geodynamického pozadia metalogenetických procesov v regióne Spišsko-gemerského rudohoria, ktoré boli podmienkou vytvorenia nerastného bohatstva tohto regiónu.

Doručené / Received: 25. 11. 2016
Priaté na publikovanie / Accepted: 15. 12. 2016

The relation of metallogeny to geodynamic processes - the natural prerequisite for the origin of mineral deposits of public importance (MDoPI): The case study in the Western Carpathians, Slovakia

ZOLTÁN NÉMETH¹, MARIÁN PUTIŠ² and LUBOMÍR HRAŠKO¹

¹State Geological Institute of Dionýz Štúr, Mlynská dol. 1, SK-817 04 Bratislava, Slovak Republic;
zoltan.nemeth@geology.sk; lubomir.hrasko@geology.sk

²Comenius University, Faculty of Natural Sciences, Mineralogy and Petrology Department,
Mlynská dolina, Ilkovičova 6, SK-842 15 Bratislava, Slovak Republic; putis@fns.uniba.sk

Abstract: The review, based on binomial division of the Western Carpathians into Inner (Internal) and Outer (External) ones, provides a chronological description of Paleozoic and Cenozoic multiple riftogenesis, subduction/collision and post-collision evolution with their metallogenetic consequences, in earlier classifications designated as Paleo-, Meso- and Neo-Variscan/Hercynian, as well as Paleo-, Meso- and Neo-Alpine phases. The introductory remarks form the base on which new tectonometamorphic and metallogenetic re-interpretations are grounded.

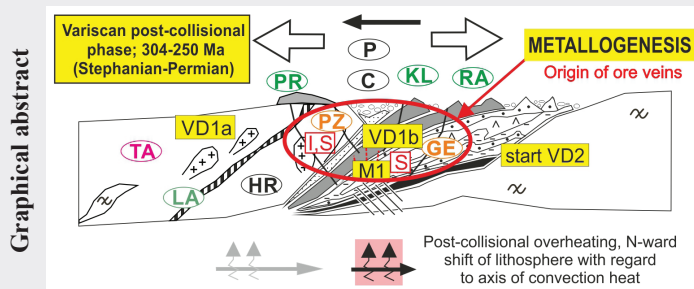
In the geological setting of the Inner Western Carpathians, the Cretaceous Paleo-Alpine crustal tectonic units (Tatric, Veporic, Gemeric and Zemplinic units) are the most conspicuous, the first three being covered by superficial nappes (Fatric, Hronic, Meliatic, Turnaic and Silicic units). Earlier, Variscan (Hercynian) basement units encompass the Paleozoic and older crystalline basement and its Paleozoic and Mesozoic cover. The remnants of the Cenozoic Meso-Alpine units crop out only at the boundary of the Outer and Inner Western Carpathians and are influenced by dominating Cenozoic-Quaternary Neo-Alpine overprint.

Four principal metallogenetic periods in the Western Carpathians are defined in the paper. A principal role in geodynamic processes as well as metallogeny of the Western Carpathians is attributed to linear source of convection heat of equatorial direction (mantle plume; hot line s.l.) acting under this orogenic belt from the Early Paleozoic until Cenozoic. During this extended period, the linear heat source has caused a multiple divergence within the Pangea (Gondwana/Laurasia) and its metallogenetic consequences - stratabound and magmatogenic mineralization during the divergent origin of elongated basins, as well as metamorphic/magmatogenic mineralization after their convergent closure by the lithospheric plates/microplates collision.

The first metallogenetic period is related to Early Paleozoic pre- and riftogeneous phases (Cambrian to Ordovician, and/or Devonian to Early Carboniferous), the second Late Paleozoic one is a consequence of Permian overheating during the Variscan post-collisional evolution, including regional extension, magmatic and metallogenetic processes, the third one is a product of Late Cretaceous overheating due to the Paleo-Alpine post-collisional phase, and the fourth one - the Neo-Alpine metallogenetic phase is a consequence of Miocene overheating and the magmatic/volcanic processes related with the heat from the asthenosphere upwelling.

The review encompasses also a brief summary of produced mineralization types.

Key words: lithotectonic units, geological evolution, metallogenesis, mineralization, mantle plume, Western Carpathians



Highlights

- Summary of Paleozoic and Cenozoic evolution of W. Carpathians including riftogenesis, subduction/collision and post-collision processes and related metallogenesis
- New model emphasizes the role of the source of convection heat (mantle plume) in geodynamic evolution and metallogenesis

Introduction

The progress in the knowledge of the setting and evolution of the Western Carpathians can be traced in episodically issued monographs on regional geology (Andrusov, 1959; Maheľ and Buday, eds., et al., 1968; Maheľ, M., 1986; Krist et al., 1992; Rakús, M., ed., 1998). The principal summaries occur in Explanations to general geological and tectonic maps 1 : 500 000 (e.g. Biely et al., 1996; Bezák, ed., 2004) or 1 : 200 000 (Bezák, ed., 2009). Further significant category is represented by the series of Explanations to general geological maps 1:50 000, covering the whole Western Carpathians in the territory of Slovakia. Concerning the regional geology an indispensable role belongs to thematic monographs (e.g. Maheľ, ed., 1979; Hovorka, ed., et al., 1985; Grecula, Hovorka and Putiš, eds., 1997; Vozár et al., eds., 2010).

Rarely there occur publications summarizing the progress in metallogenetic concepts (e.g. Lexa, ed., et al., 2007; Ilavský and Sattran, 1980), though the metallogeny is treated preferably in the scale of selected regions (e.g. Bartalský, ed., et al., 1993; Grecula et al., 1995; Slavkay et al., 2004; Grecula and Németh, eds., 1996; a.o.), or is a topic of specialized conferences (e.g. Ilavský and Maljkovič, eds., 1980).

Above mentioned publications, as well as hundreds articles dealing with the Western Carpathian geology and metallogeny, represent a ground for the summary presented in this paper.

Remark 1 - Terminology of Paleozoic orogenic/metallogenetic events - Variscan vs. Hercynian

In Europe, as well as in Slovakia, two terms - *Variscan* and *Hercynian* - are simultaneously used for designation of the same orogenic process and related metallogenetic events.

The term *Variscan* for orogenic phase, promoted by Eduard Suess in 1880, was derived from the Medieval Latin name of the district Variscia. The term *Hercynian* was derived from the Hercynian Forest. Both terms were firstly used for the field registration of the trend of planar structures. The Variscan trend **SW-NE** reflected the fold belt in Germany, being later designated as *Variscan*. The first division of the European Variscides, which is still valid, was done by the German geologist Franz Kossmat (1927).

The designation Hercynian, firstly related to **NW-SE** trending Harz Mts. in Germany, was later also used for designation of the orogenic process.

Today the terms Hercynian and Variscan are generally understood as synonyms. The less frequently used term Hercynian, preferred in the 1990s by several Swiss, French and Spanish geologists, related to relatively tight strip of crystalline basement massifs (Gothard, Aar, Mont Blanc, Aiguilles Rouges, Belledonne, Pelvoux and Argen-

tera) squeezed between Variscan basement from the N/NW and pre-Triassic Alpine basement from the S/SE, as well as their orogenesis. The term Variscan is more frequent, being used e.g. by J. F. von Raumer, G. M. Stampfli, S. M. Schmid, M. R. Handy, S. Cloetingh, F. Neubauer, R. Schuster, W. Franke, H. G. Dill and many others, including the geological community of the Carpathian-Balkan Geological Association (cf. Vozár et al., eds., 2010).

The first author of this study is convinced about the priority of the use of the term *Variscan* for both - orogenic and metallogenetic events throughout the whole Western Carpathians (Variscan metallogenesis in the Variscan orogenic belt). Following the tradition in published summaries (e.g. Bezák, ed., et al., 2004, 2009; Rakús, ed., 1998), and avoiding re-definition of codified terms (e.g. Lexa et al., 2007), besides the term Variscan in this paper there is used also the term Hercynian, according to original published sources, emphasizing that both are understood like synonyms.

Remark 2 - Proto-Tethys, Paleo-Tethys, Neo-Tethys

We use the terms Proto- and Paleo-Tethys as principal Early Paleozoic oceans, the development of which is related to Avalonia and Armorica microplate detachment from the northern Gondwana margin according to paleotectonic reconstructions (e.g., von Raumer, 1998; Stampfli and Kozur, 2006; von Raumer and Stampfli, 2008).

In the territory of the Western Carpathians, the rifting of the Proto-Tethys Basin was reported by Putiš (1992). The Proto-Tethys (Cambrian to Ordovician) basement complexes were defined and dated by Putiš et al. (2008, 2009) and Vozárová et al. (2010).

The Paleo-Tethys was firstly described by Grecula (1982) and its closure with collision/obduction processes and the origin of the Rakovec suture zone by Németh (2002). The Paleo-Tethys (Devonian to Early Carboniferous) basement complexes were reported and dated by Putiš (1992) and Putiš et al. (2009), respectively.

The Neo-Tethys started its rifting on the eastern side of Gondwana (Muttoni et al., 2009) in the Early Permian and continued in the Early Triassic, including the territory of future Western Carpathians. The opening of Neo-Tethys was related to northwest-ward subduction of the Paleo-Tethys oceanic crust below the eastern Pangea margin (Stampfli, 1996), followed by the Kimmerian orogeny, originally designating the mountain-building process in the Central Asia during Jurassic period. Despite, our paper provides an alternative interpretation (cf. evolutionary phases D-E).

The Alpine events related to opening of the Atlantic ocean (Alpine Tethys sensu Schmid et al., 2004) included a continual zones with oceanic crust of the Ligurian and Piemont, Penninic, or Váhic and Magura segments (cf. Missoni and Gawlick, 2011). In the Western Carpathians

the Alpine events encompass the closure and subduction/collision of these segments and north-vergent nappe piling (Plašienka et al., 1997; Hók et al., 2014) from the Early Cretaceous (Paleo-Alpine) to Miocene (Neo-Alpine) period, but also a volcanism, building extended strato-volcanic systems withing the Western Carpathians in the Neo-Alpine period.

Remark 3 - The terminology of the Western Carpathian regional geological units:

In the geological literature, the units of the Western Carpathians are named inconsistently, e.g. in the case of Gemericum also as Gemeric unit or Gemeric nappe, at Meliaticum there is used Meliatic unit, Meliata unit, vs. Meliatic (Bôrka) nappe, or at Silicicum - the Silicic unit, Silica unit, vs. Silicic nappe, etc. In this paper we prefer the second type of description, applying the adjective of the name plus the word unit in the sense of tectonic unit.

The Tatric unit, Veporic unit, Gemeric unit, etc., were individualized as tectonic units during the Paleo-Alpine phase. When dealing in the text about Variscan events and the Paleozoic rock sequences of these units, instead of complicated expression, e.g. “rocks of future Veporic unit”, “rocks of future Gemeric unit” we use more convenient expression “Paleo-Veporicum”, “Paleo-Gemicum”, etc.

Remark 4 - Principles of designation of deformation phases

As was clearly demonstrated in the case of Gemeric unit, the divergent orogenic processes (riftogenesis, origin of the basin with oceanic crust) later switch to convergent ones (subduction, closing of the basins by collision of lithospheric plates/microplates, origin of the mountain (orogenic) belts). The *period of collision* is accompanied with the strongest deformation, and as traditionally applied in the terminology of structural geology, it is designated as the *first deformation phase D1*. Post-collisional overheating of a collision zone (metamorphic core complex; hot line) leads to vertical uplift of this zone, being accompanied with gravitation instability and gradual extensional unroofing, either to one or both sides of this uplifting zone. Unroofing with accompanied ductile to brittle-ductile deformation along unroofing normal fault zones, is designated as *D2 phase*. The post-collisional intra-plate stresses are eliminated by a conjugate system of subvertical shear zones with subhorizontal mutual displacements of individual blocks. Their increased activity is designated as *D3 deformation phase*. The earlier establishing of the principal faults of the D3 system as transform faults of the previous divergence/convergence periods cannot be excluded.

In the case of Gemeric unit, the Variscan processes are marked as VD1 and VD2, and the Paleo-Alpine evolution as AD1, AD2 and AD3 (cf. Németh et al., 2012a; Figs. 3 and 4 *ibid.*).

The designation of deformation events in the sequence from compressional to extensional is native for the structural geologists. Despite, we must have in mind that this succession of events does not correspond with sequence of events within the orogenic (Wilson) cycle, which start with extension (embryonal phase) and terminate with collision (the mature phase). By this way there originate discrepancies in designations of transition periods between subsequent orogenic cycles, encompassing also designation of metamorphic phases (and related metallogenetic stages). For example in the Gemeric unit, the Permian overheating, metallogeny and the VD2 unroofing are designated as the culminating tectonometamorphic process of Variscan era, though concerning the orogenic (Wilson) cycle they represent embryonal phase of the following Alpine cycle.

Remark 5 - Heat flow in metallogenetic processes

- A. Heat flow related to subduction processes. Within the globe, there exist subduction zones of two types: A1 - The Circum-Pacific type and A2 - The equatorial mobile zone type of repeated disintegration of Pangea to Laurasia (Euroasia) and Gondwana by penetration of the Paleo- and Neo-Tethyan branches with multiple orogenic (Wilson) cycles. The subduction zones are trending generally east-west (for further characteristics of subduction zones in the global scale cf. e.g. Doglioni et al., 1999). As interpreted in the case of the Western Carpathians by numerous works (e.g. Konečný et al., 2002), the heat flow related to upwelling of the asthenosphere during subduction process is supposed to be a reason of Neogene volcanic activity and related metallogenesis. The mantle wedge related to south dipping subduction slab from the Penninic type Váhic/Magura oceanic basins underneath the Western Carpathians is clearly visible in recent reconstructions based on geophysical data (e.g., Leško et al., 1988; Tomek, 1993; Bezák et al., 1997; Lexa and Konečný, 1998; Kytková et al., 2007). Such heat flow source is responsible for the Miocene arc-type volcanism and related metallogenesis. This is consistent with the fact that no ore veins are known away of volcanic structures (belts of volcanoes, stratovolcanoes), i.e. no Miocene ore veins penetrate older (Paleozoic or Mesozoic) rocks distant from the Neogene volcanic fields. This simple fact indicates that the subduction-related heat flow is insufficient for the large-scale regional overheating and metallogenesis.
- B. Collision-related heat flow (e.g. Buck and Toksöz, 1983; Harris et al., 1994; Thompson and Connolly, 1995). The rock sequences become sufficiently overheated after the termination of collisional phase due to the thrusting induced crust thickening (e.g. Jaupart and Provost, 1985). The related thermal products throughout the large regions (S-type granites, delibe-

rated fluids infilling extension fractures forming veins frequently with ore mineralization) indicate that this is the reason of post-collisional large-area Permian metallogeny in the Gemeric unit. The crust thickening occurred that time by the south-vergently overthrust of the “Paleo-Veporicum” onto the “Paleo-Gemicum”. Similarly, the Late Cretaceous metallogenesis in the Veporic unit was a consequence of the north-vergent overthrust of the Gemeric unit onto the Veporic one.

Remark 6 - Recent spatial description of orogenic processes vs. Neogene rotation of plates/blocks

Recent description “north”, “south”, etc., regarding the recent coordinates is relative, because, as manifested by numerous paleomagnetic studies, the extensive plates/blocks rotations occurred mainly during the Neogene (cf. Márton and Fodor, 1995; Kováč and Márton, 1998, and following works).

Division of geological units in the Western Carpathians

The recent course of the lithotectonic units of the Western Carpathians is a product of Alpine (Paleo-, Meso- and Neo-Alpine) collision and related stress fields, which segmented, laterally translated and eventually rotated also the products of earlier Variscan setting.

Despite several divisions of lithotectonic units of the Western Carpathians were proposed and used in the past (e.g. Andrusov, 1968; Mahel', 1986; Biely, 1989; Biely et al., 1996; Kozur and Mock, 1996, 1997; Plašienka et al., 1997), in this paper we use the division proposed by Hók et al. (2014), based on tectonic superposition (subhorizontal nappe boundaries) of the main tectonic units of the Western Carpathians. According this division the *External* (in former designation *Outer*) *Western Carpathians* consist of the *Outer group of nappes* - Krosno unit, Magura unit and Oravic unit, being tectonically individualized in the Neogene. The *Internal* (Inner) *Western Carpathians* consist of the *Lower group of nappes* - Váhic and Tatric units (individualization in the Late Cretaceous-?Paleogene), the *Middle group of nappes* - Hronic, Fatric and Veporic units (individualization in the Upper Cretaceous - Cenomanian/Turonian), and the *Upper Group of nappes* - Gemeric unit, the Bôrka nappe, as well as the Meliatic, Turnaic and Silic units (individualization in Early Cretaceous; l.c.).

The division of the Variscan (Hercynian) lithotectonic units (Putiš, 1992; Bezák, 1994; Bezák et al., 1997) follows the concept reflecting their tectonic superposition, when the *upper unit* (gneiss-migmatitic) thrust over the *middle unit* (gneisses to micaschists) and both are thrust over the low grade metamorphites of the *lower unit*.

Evolution and metallogenetic events in the Western Carpathians

To avoid changes of already codified and widely used terms, the evolutionary phases used in this summary paper are based on the division by Bezák, ed., et al. (2004) and the metallogenetic events and mineralization types follow the division by Lexa et al. (2007). The reader of this summary must have in mind that each metallogenetic period has its reasons and their consequences. Therefore in our division we prefer direct naming of processes, prevailing in individual evolutionary phases (riftingogenesis, collision, post-collisional overheating and metallogenesis) especially in the Pre-Alpine ones. The Variscan and Alpine tectonic setting originated preferably due to compressional convergent events, but the metallogeny benefits predominantly from the overheating during extensional (divergent) events. Therefore in appropriate cases the division of orogenic phases is refined by the designation “late- to post orogenic phases” (cf. l.c.).

A. Variscan riftogeneus phase; Early Paleozoic. Paleo-Hercynian phase sensu Lexa et al. (2007). First principal metallogenetic period in the Western Carpathians. (Fig. 1A.)

The Variscan crystalline basement forms the oldest constituents of geological setting of the Western Carpathians (Fig. 1 A-E). Despite the prevailing Early Paleozoic ages of the higher-grade metamorphic rocks – eclogites, para- and orthogneisses, the Pre-Cambrian zircon ages of their sources (Putiš et al., 2008, 2009) indicate a sporadic existence also of the Pre-Variscan rocks and tectono-metamorphic events within the Western Carpathians crystalline basement.

From the NW and N the Western Carpathians are underlain by submerged European platform with the Variscan and Cadomian crystalline basement. The Variscan units of the recent Western Carpathian orogenic belt originated in the pre-Permian period between former continents of Gondwana and Laurasia.

Metallogenetic processes in the **Paleo-Tatricum** and **Paleo-Veporicum** were a consequence of the ultramafic magma uprise (cf. Maruyama et al., 2007) and the origin of Ni-Cu; magmatic and hydrothermal mineralization, as well as basic and acid volcanism - **syngenetic volcanic massive sulphide mineralization** (pyrite-pyrrhotite), **stratabound mineralization in black schists** (metalliferous black schists, stratabound scheelite occurrences) and **stratabound (stratiform sedimentary) Fe mineralization** (iron-rich crystalline schists). These mineralization products were during the final phases of Variscan convergence metamorphosed together with their host rocks.

The Early Paleozoic riftogenesis within the **Paleo-Gemicum** was reported by Grecula (1982). The beginning of the riftogenesis was accompanied with the origin of the black schists (organic matter + pelitic sediments ± limestones) horizon and later two horizons with bimodal volcanic products (basalt and andesite-rhyolite) were formed. The riftogeneus metallogenetic events encompass the **syngenetic volcanic massive and disseminated sulphidic mineralization** where the amount of $\text{Fe} \gg \text{Cu} > \text{Zn} \pm \text{Mo-Sn-Ba}$ sulphides related to the former underwater “black-smoke” (Radvanec and Bartalský, 1987; Bartalský and Radvanec, 1993; Radvanec and Grecula, 1985; Grecula et al., 1995). This type of the stratiform sulphidic mineralization is known as the Smolník (deposit) type in the above mentioned studies. The second type of stratiform sulphidic mineralization has formerly originated from the “white-smoke” in the oceanic rift. This type, rich of Cu-Pb-Zn-Ag-As sulphides, is known in the literature as the Mníšek type of stratiform sulphidic mineralization (Grecula et al., 1995). Locally, the **stratabound (sulphidic) mineralization in black schists** (metalliferous black schists) and **exhalative/sedimentary and sedimentary Fe and Mn mineralization** (stratabound hematite-magnetite and manganese) has occurred. In the sea floor close to the spreading mid-oceanic ridge the black schists and basalt were metamorphosed in the HT/LP amphibolite facies - metamorphism **M0**, forming the gneiss-amphibolite complex (Radvanec et al., 2014). The Lower Paleozoic sequences with stratabound mineralization were during later Permian (Variscan post-collision phase with the input of mantle heat) metamorphosed (**M1**) within the range from the greenschists facies up to anatexis in amphibolite facies (Grecula et al., 1991).

B. Variscan collision in the zone of Paleo-Tatricum and Paleo-Veporicum (Devonian; 415-380 Ma) and subsequent Early Carboniferous subduction (380-340 Ma). A pre-Meso-Hercynian and Meso-Hercynian orogenic phase sensu Lexa et al. (2007). (Fig. 1B.)

The Early Variscan collision (Fig. 1B, left-hand side) in the zone of Paleo-Tatricum and Paleo-Veporicum followed the closure of the Proto-Tethys (Devonian; 415-380 Ma; A pre-Meso-Hercynian orogenic phase sensu Lexa et al., 2007). In the **Paleo-Tatricum** and **Paleo-Veporicum** the south-vergent stacking of Variscan lithotectonic units has formed nappes with the high-grade and low-grade metamorphic rocks (cf. Putiš, 1992; Bezák et al., 1997; Putiš et al., 2009). The **Paleo-Gemic** zone was located in the frontal part of the orogen, therefore the south-vergent Variscan nappe stacking of the volcanosedimentary rocks in this zone has occurred in the Western Carpathians as the last one after the closure of the Paleo-Tethys (Fig. 1B, right-hand side), being accompanied with prior exhu-

mation of the blocks of high-pressure metagabbros along the axis of the Variscan Rakovec suture zone (Radvanec, 1999; Németh and Radvanec, 2012b). The overthrusting of the Paleo-Gemic sequences (Gelnic Group) on the Pan-African basement is also supposed (Putiš, 1992; Bezák in Lexa et al., 2007).

The collision process was relatively cold, so the Meso-Variscan mineralization products are relatively scarce even in the metamorphic complexes of the Tatric and Veporic units (“skarns” - iron-rich crystalline schists, graphite).

C-D. Variscan collision of the Paleo-Tatric-Veporic block with Paleo-Gemic zone, location of the source of convection heat (hot line) and metallogenesis in Paleo-Gemicum and neighbouring Paleo-Veporicum. Second principal metallogenetic period in the Western Carpathians. Carboniferous-Permian; 340-250 Ma. Neo-Hercynian late-orogenic and post-orogenic phases sensu Lexa et al. (2007). (Fig. 1C, D.)

The Variscan collision of basement units has resulted in the thickening of continental crust, related metamorphic core complex and intrusion of the late-orogenic and post-tectonic I, S to A type granitic rocks. The fast erosion and molasse deposition were accompanied with local acid volcanism. The Hronic and Gemic zones registered the Late Carboniferous (Stephanian) molasse deposition, Permian extension to shallow marine sedimentation and bimodal basalt/rhyolite volcanic activity.

The Early Carboniferous calc-alkaline subduction-related- and collisional granitoids of I and S types (hybrid tonalites and granodiorites), were followed by the emplacement of Middle Carboniferous peraluminous S-type granites and subaluminous I/S-type granodiorites. The ore mineralization connected with the subduction related granitoids is without economic significance (stibnite and molybdenite mineralization associated with the leucogranitic apophyses). The post-collisional S type anatectic melting has brought the gold mineralization (with pyrite/arsenopyrite), related with leucocratic muscovite-rich granite and surrounding metamorphic rocks. The Au-W (gold-scheelite) mineralization with pyrite/arsenopyrite, as well as Pb-Ag mineralization are known from the zone of the Nízke Tatry Mts. Economically the most important from this area is the low temperature Au-Sb mineralization (Grecula et al. as well as Slavkay and Chovan in Grecula and Németh, 1996).

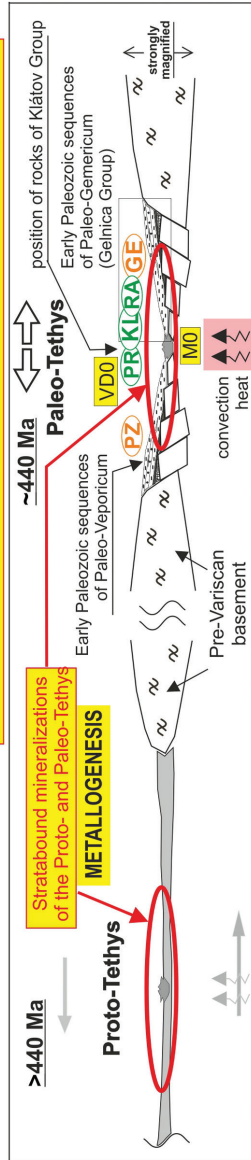
Post-collisional A-type and A/S type granites originated from relatively hot and dry magma in extensional environment in continental deeply rooted lineaments during Variscan consolidation (cf. Uher and Broska, 1996). They encompass the **suite of S/A-type post-orogenic granites in the Veporic unit (Hrončok type)**. In metamorphic schists,

S

Variscan riftogene phase (Early Paleozoic)
Paleo-Hercynian phase sensu Lexa et al. (2007)

A

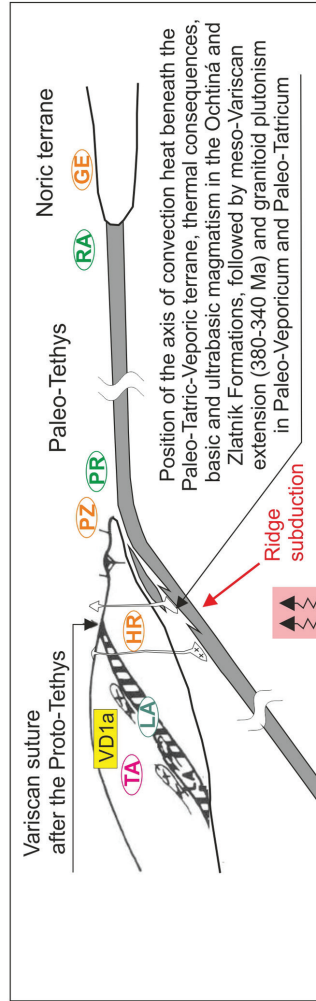
First metallogenetic period in the Western Carpathians



Modified original:
Németh (2005)
Putiš et al. (2009)

Early Variscan collision in the zone of Paleo-Tatricum and Paleo-Veporicum following the closure of Proto-Tethys (Devonian; 415-380 Ma) and subsequent Early Carboniferous subduction (380-340 Ma)
A pre-Meso-Hercynian and Meso-Hercynian orogenic phase (sensu Lexa et al., 2007)

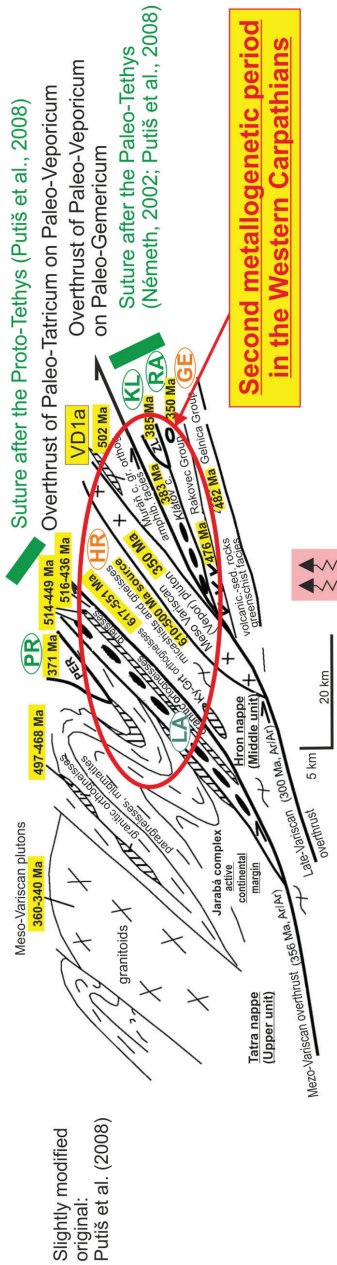
B



Modified original:
Németh (2005),
Putiš (1992)

Variscan collision of the Paleo-Tatric-Veporic block with Paleo-Gemeric zone; Carboniferous-Westphalian; 340-304 Ma) Neo-Hercynian late-orogenic phase sensu Lexa et al. (2007)

C



Slightly modified original:
Putiš et al. (2008)

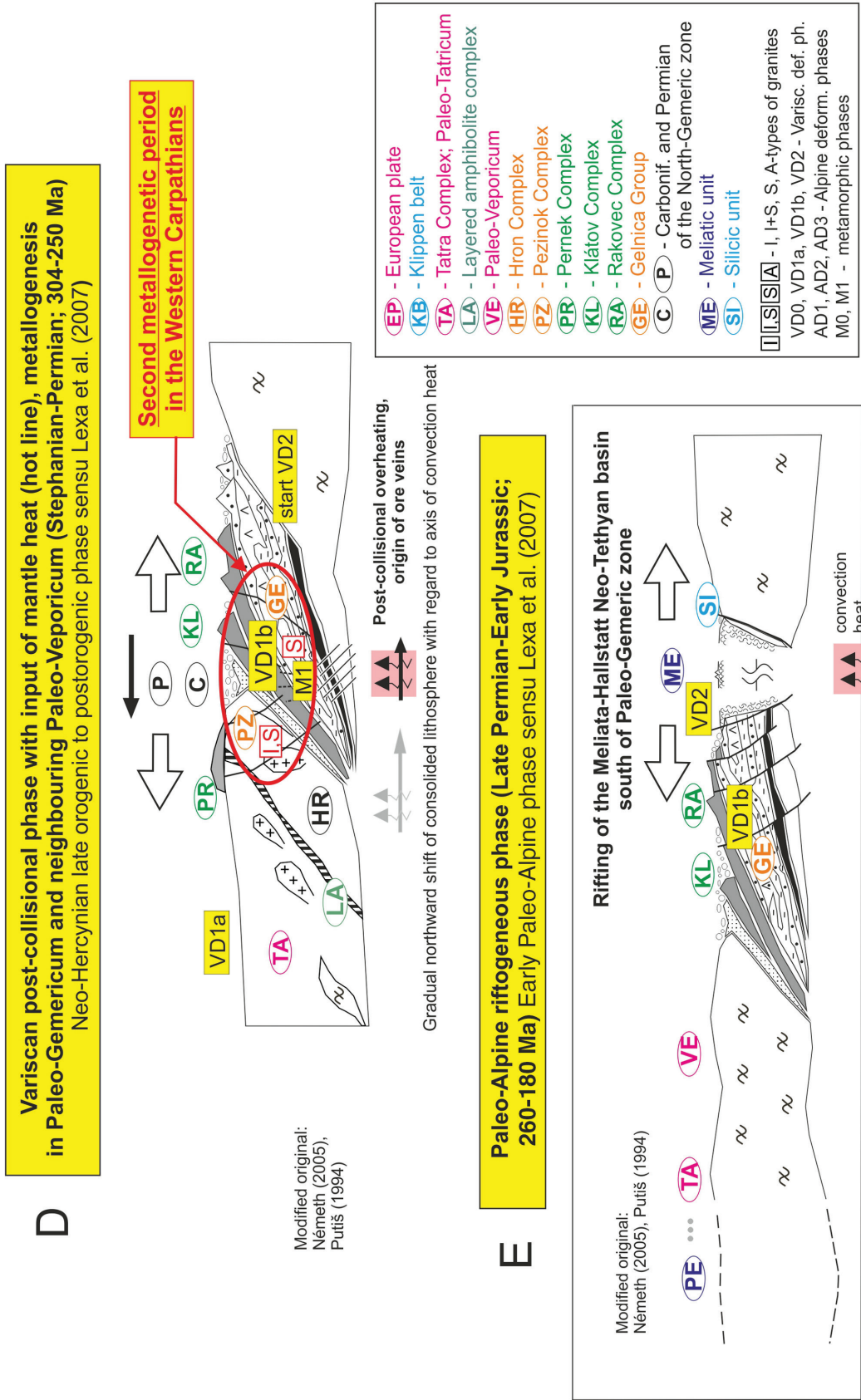
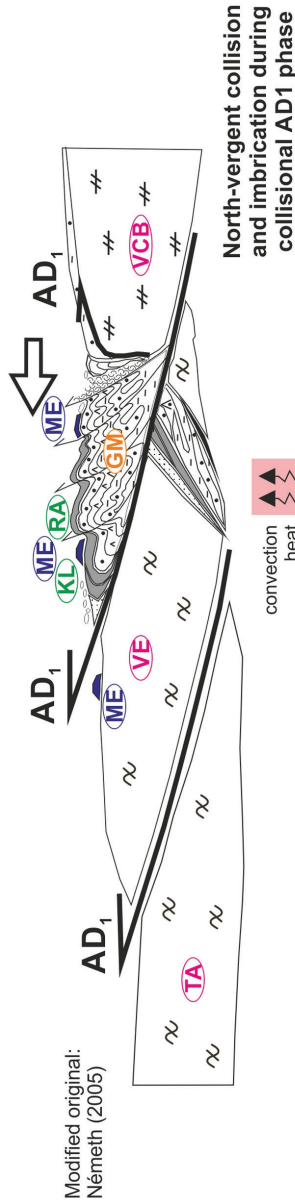


Fig. 1 A-E. Geodynamic evolution and metallogenesis of the Western Carpathians from Ordovician to Early Jurassic. Vertical scales in cross-sections are strongly magnified.

N

F

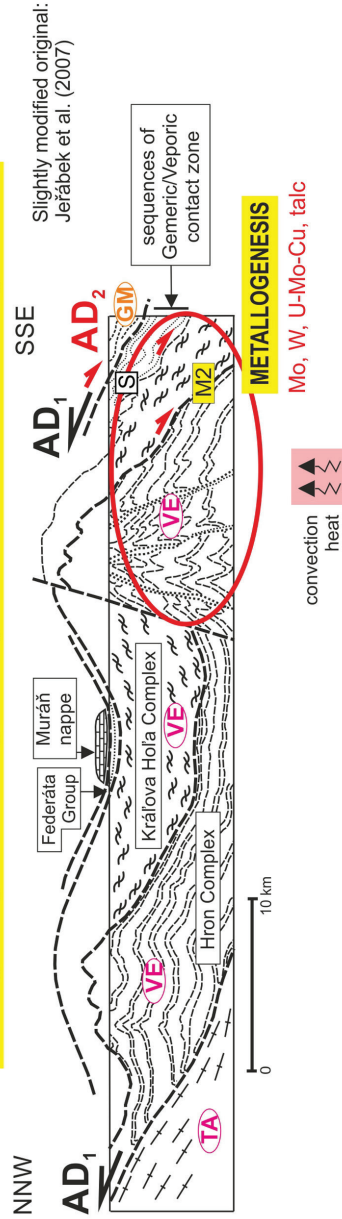
Paleo-Alpine collisional phase (Early Cretaceous; 130-106 Ma)
Paleo-Alpine orogenic phase sensu Lexa et al. (2007)



G

Paleo-Alpine post-collisional phase with the addition of heat and metallogenesis
(Late Cretaceous; 106-70 Ma) Paleo-Alpine late-orogenic phase sensu Lexa et al. (2007)

Third principal metallogenetic period in the Western Carpathians



H

Meso-Alpine post-collision phase/Early Neo-Alpine transposition (Paleogene; 70-24 Ma)
Post-orogenic/Early Neo-Alpine phase sensu Lexa et al. (2007)

Weathering of earlier exhumed ultramafic rocks (Ni-Co), weathering of carbonates of higher nappes (bauxite), origin of sedimentary-diagenetic mineralization in the Paleogene flysch (Mn), several gold anomalies in heavy minerals concentrates due to weathering of host rocks

S

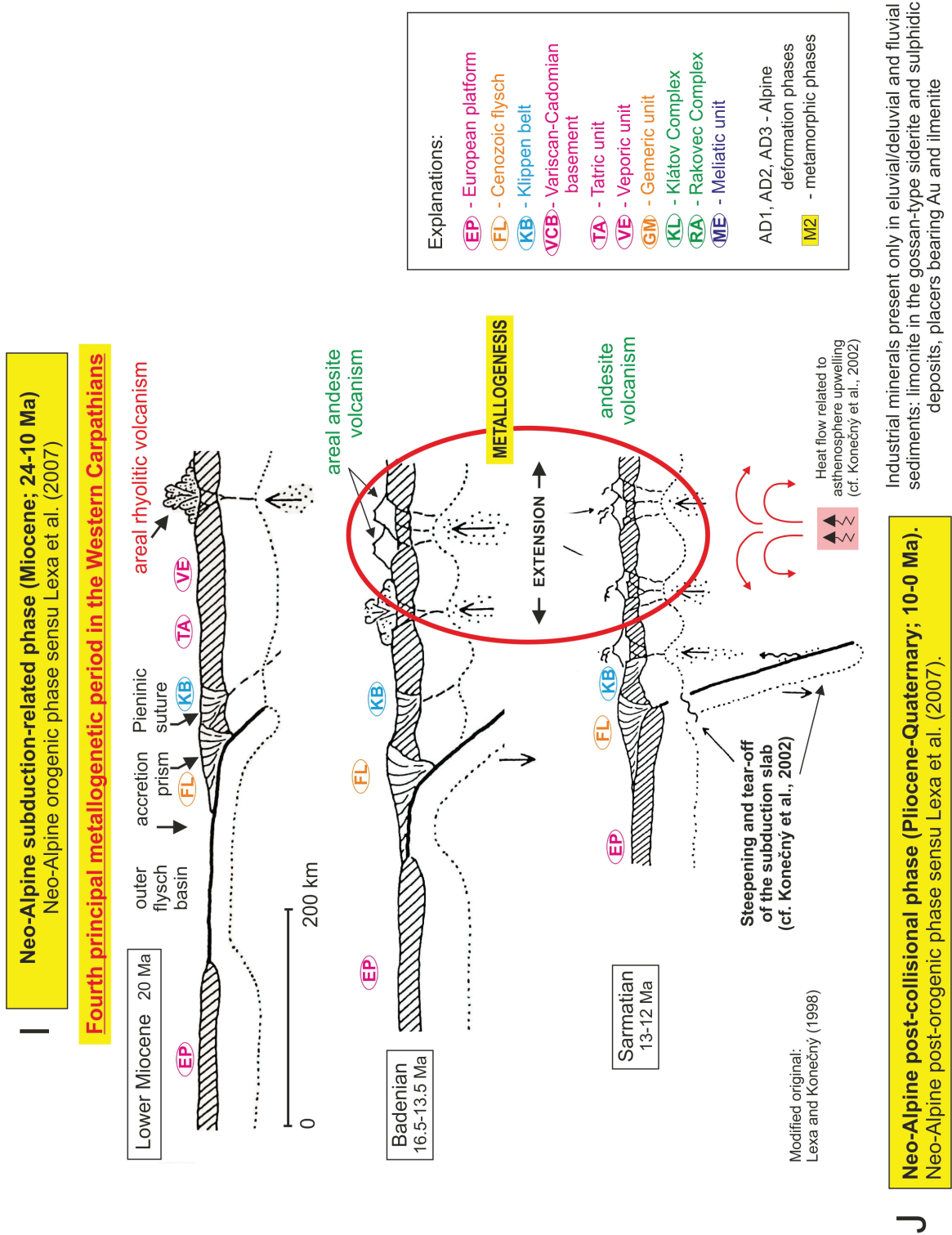


Fig. 1 F-J. Geodynamic evolution and metallogenesis of the Western Carpathians from Early Cretaceous to Quaternary. Vertical scales in cross-sections are strongly magnified.

the Hrončok granite body is surrounded by quartz veins with gold-scheelite mineralization (Hvožd'ara, 1967). **The suite of S/A-type post-orogenic granites in the South Veporic unit (Klenovec type; Hraško et al., 1997)** is perspective also for gold mineralization.

Summary of the collision related metallogenesis in the crystalline basement of the **Paleo-Tatricum and Paleo-Veporicum** (Neo-Hercynian late-orogenic phase; Lexa et al., 2007): **pneumatolytic-hydrothermal and hydrothermal mineralization (Mo), hydrothermal vein and shear-zone mineralization** (Au-scheelite-arsenopyrite, quartz-arsenopyrite-Au, Ni-arsenopyrite, quartz-stibnite-Au, Pb-Zn-Ag, barite and hematite deposits and occurrences).

Metamorphosed (**M1; VD2**) volcanosedimentary complexes of **Paleo-Gemicum** (Neo-Hercynian late- to post-orogenic phase sensu l.c.): Metamorphic-hydrothermal vein siderite-sulphide and metasomatic magnesite and siderite mineralization, vein siderite-sulphide and stibnite-gold mineralization. Another group of researchers (e.g. Hurai et al., 2002, 2011; Lexa et al., 2007) assign these mineralization types to the Late Cretaceous Paleo-Alpine orogenic and post-orogenic phases.

Specialized post-orogenic S-type granitic magmatism in Paleo-Gemicum: plutonic-hydrothermal (greisen type) stockwork/disseminated mineralization (Sn, Sn-Ta-Nb, Li-Rb), hydrothermal vein-type mineralization (U-TR-AU). Granites of this type contain higher content of B, F, Li, Rb, Sn and W, Mo.

Permian extension, basalt-rhyolite volcanism – hydrothermal disseminated and vein mineralization (Cu, barite), syngenetic/diagenetic and infiltration mineralization (U-Mo±Cu).

E. Paleo-Alpine riftogeneous phase (Late Permian–Early Jurassic; 260–180 Ma). Early Paleo-Alpine phase sensu Lexa et al. (2007). (Fig. 1E.)

The beginning of Alpine cycle was accompanied with the divergence and transgression of the sea over the eroded surface of the Variscan continental crust, starting with the basal conglomerates and quartzites, shales, carbonate platform deposition during the Middle and Late Triassic. The beginning of this evolutionary phase encompasses the **VD2** opening of the Meliata-Hallstatt oceanic domain, located south of consolidated Paleo-Gemicum. The Late Triassic rifting in the spreading zone has disintegrated the carbonatic platform, so the zones of shallow water sedimentation alternated with the zones of the deep water deposition (Mello, ed., et al., 1997). Due to the location of the mid-oceanic rift along the southern margin of the Western Carpathians and later dip of the subduction slab to the south – away of this territory, the Early Paleo-Al-

pine evolutionary phase remained with less significant metallogenetic products in the Western Carpathians: the uppermost Permian to Jurassic sedimentary mineralization (hematite), Middle Triassic evaporites and Jurassic chromite occurrences bound on serpentinitized ultramafic rocks thrust over the Gemic region in the following - Paleo-Alpine orogenic phase (the Bôrka nappe; **AD1**).

F. Paleo-Alpine collisional phase (Early Cretaceous; 130–106 Ma). Paleo-Alpine orogenic phase sensu Lexa et al. (2007). (Fig. 1F.)

Rearrangement of the Atlantic ocean spreading during the Late Jurassic and Cretaceous caused the closure of the Neo-Tethyan Meliata-Hallstatt ocean between African and European plates. The final continent/continent collision formed the nappe stack of Gemic and Meliatic units, including the exhumation of the medium- and high-pressure rocks of blueschists and serpentinites (the Bôrka nappe Mello et al., 1998; Putiš et al., 2014 and references therein). Especially the exhumed hanging wall metaperidotite and serpentinite tectonic blocks locally contain **minerals of platinum group (PGM)** and occurrence of Pd minerals prevails over the mineral assemblages of Os, Ir, Ru, Rh and Pt (Radvanec and Uher, 2016). The Early and Middle Cretaceous collision formed in the Internal (Inner) Western Carpathians a sequence of the north-vergent nappes: over the *Lower group of nappes* - Vâhic and Tatric units, are thrust the *Middle group of nappes* - Hronic, Fatric and Veporic units, and the *Upper Group of nappes* – Gemic unit, the Bôrka nappe, as well as the Meliatic, Turnaic and Silicic units. The highest nappe (Silicic unit) is built of sequences attributed to the south-located African plate. Cold deformation (**AD1**) and tectonometamorphic processes do not support the interpretation of the origin of metamorphic-hydrothermal vein mineralization within the Gemic unit during this phase.

G. Paleo-Alpine post-collisional phase with the addition of heat and metallogenesis (Late Cretaceous; 106–70 Ma). Paleo-Alpine late-orogenic phase sensu Lexa et al. (2007). ***Third principal metallogenetic period in the Western Carpathians.*** (Fig. 1G.)

Uplift of the southern zone of Veporic unit (cf. e.g. Jeřábek et al., 2007) due to the origin of metamorphic core complex, accompanied unroofing (**AD2**) and sporadic granites in the contact zone of Veporic and Gemic units (Rochovce area), favour to vigorous metallogenetic processes within the Veporic unit (**M2** metamorphism).

The hidden Late Cretaceous granite of the Rochovce type (Klinec et al., 1980) has a complicated magma crystallization history (Klinec et al., 1980, Határ et al.,

1989), which led to intrusion of two separated magmatic phases - from calc-alkaline type magma with mixed source to highly fractionated calc-alkaline magma. This second phase is enriched in Rb, Be, Ga, Mo, W, Pb, Ta, HREE, Th, U and F, Cl (Hraško in Petrik et al., 2001). Mineralization of porphyry and vein systems contains internal zone with quartz-molybdenite, pyrite, pyrrhotite, magnetite and external zone formed with quartz-scheelite, molybdenite, wolframite and Cu, Pb, Zn, Fe and As sulphides, as well as peripheral zone with sulphosalts of Bi, Pb, Sb, As. Increased activity of fluorine is connected with fluorite-quartz veins. The origin of Cretaceous granite in the zone Ochti-ná-Rochovce Radvanec (1994) relates with the extensional tectonics and anatectic melting of primary lithology containing Ca component (carbonate + oligoclase-andesine). This model is in full concordance with generally accepted and proved model of the Late Cretaceous post-collisional unroofing

Granitic magmatism (Veporic unit) has produced the **magmato-hydrothermal stockwork/dissemination mineralization** (Mo, W), **hydrothermal vein/stockwork $\pm$ metasomatic mineralization** (base metal and pyrite occurrences). The AD2 unroofing is connected also with the **remobilization of older stratiform mineralization** (U-Mo-Cu in the Permian host rocks of the North-Gemeric zone; Szabó et al., 2014), as well as the **origin of talc in magnesite bodies** present in the contact zone of Gemic and Veporic units, but also in several shear zones within the Kohút zone of Veporic unit (Radvanec and Prochaska, 2001; Németh et al., 2004; Radvanec et al., eds., 2010). New structural observations within the Early Paleozoic sequences of the Gemic unit close to the base of the Gemic basement nappe have revealed also the evidences of kinematics of the Alpine AD2 unroofing within magnesite bodies, being accompanied with the origin of talc mineralization (Németh et al., 2015).

H. Meso-Alpine post-collision phase/Early Neo-Alpine transpression evolution (Paleogene; 70-24 Ma).

Post-orogenic/Early Neo-Alpine phase sensu Lexa et al. (2007). (Fig. 1H.)

The Central Carpathian block was finally consolidated in the Late Cretaceous time and became subjected to the uplift and erosion. Its northern margin was continuously active, as the orogenic front advanced gradually beneath the flysch basin. Virtually, this evolutionary period did not produce new mineralization of metamorphic, magmatic or volcanic type, but provided conditions for the weathering of earlier exhumed ultramafic rocks (Ni occurrences), weathering of limestones and dolomites of higher nappes (bauxite), and origin of sedimentary-diagenetic mineralization in Paleogene flysch (Mn). Some anomalies of gold

in the heavy mineral concentrates can be associated with weathering of host rocks.

I. Neo-Alpine subduction-related phase (Miocene; 24-10 Ma) – Fourth principal metallogenic period in the Western Carpathians. Neo-Alpine volcanic phase sensu Lexa et al. (2007). (Fig. 1I.)

The continent/continent collision was accompanied with the subduction rollback (slab verticalization and detachment (cf. Konečný et al., 2002; Harangi and Lenkey, 2007; Harangi et al., 2007a, b). The asthenospheric uprise and the back arc extension most probable initiated the partial melting of the overlying crust, producing along the cross faults an intensive rhyolite and andesite volcanism, accompanied with subvolcanic intrusive complexes. The mineralization of the Miocene Neo-Alpine phase encompasses the **intrusion related mineralizations** (magnetite skarns, porphyry and porphyry-skarn Cu $\pm$ Au, Mo), **stockwork/disseminated base metal mineralization** (local low temperature Hg mineralization), **high sulphidation epithermal mineralization** (Au, sulphur), **volcanic hosted low sulphidation epithermal mineralization** (base metals, Ag, Au, Sb-Au, Hg), **sediment hosted epithermal/telethermal mineralization** (base metals, Au, Hg, Sb, As), **hot spring-type** (Hg, Au) and **cold spring-type mineralization** (goethite-limonite), as well as **stratabound infiltration mineralization** (pelosiderite) (Lexa et al., 2007).

J. Neo-Alpine post-collisional phase (Pliocene-Quaternary; 10-0 Ma). Neo-Alpine post-orogenic phase sensu Lexa et al. (2007).

The Neo-Alpine collision of the Carpathian arc with the European platform, which terminated in its western segment by the end of Middle Miocene, was followed with an uplift of the mountain ranges owing to isostatic equilibration and thermal subsidence of former extensional basins. Continuing volcanism in the Eastern Carpathians was responsible for the lasting extension conditions that caused the uprise of mafic alkali magmas, giving rise to scarce alkali basalt volcanoes (Šimon, 2000; Konečný et al., 2002; Šimon and Maglay, 2005). Mineralization occurrences related to this phase are restricted exclusively to eluvial/deluvial and fluvial deposits (limonite in gosans of siderite and sulphide deposits, gold placers, ilmenite accumulations).

Conclusion

The paper provided a brief review of the geological evolution of the Western Carpathians during the Variscan (Hercynian) and Alpine orogenic cycles. The general out-

line of the main metallogenetic events and their products emphasizes the existence of four principal metallogenetic periods, tied with the increased crustal heat flow: (1) **Early Paleozoic Variscan riftogeneous phase** (Fig. 1A) (2) **Variscan collision of the Paleo-Tatric-Veporic block with Paleo-Gemic zone, origin of metamorphic core complex with the contribution also of mantle heat (hot line) and dominant location of metallogenesis in Paleo-Gemicum and neighbouring Paleo-Veporicum in Permian due to input of convection heat** (Fig. 1C, D), (3) **Late Cretaceous Paleo-Alpine post-collision phase with the addition of mantle heat flow into the collided Veporic terrane** (Fig. 1G), and (4) **Miocene Neo-Alpine volcanic-related phase** (Fig. 1I.). The paper provides an explanation, why the principal metallogenetic processes (economically the most important ore reserves generation) of Permian time are located in the Paleo-Gemic zone, but in the Late Cretaceous time in the Veporic zone: In both metallogenetic periods the ore generating is based on metamorphic-core complexes principles, though the principal difference is that in the Western Carpathians (like also in other places in the Alpine orogenic zone) the Variscan orogenic processes (incl. thrusting, nappe piling, etc., with related thermal consequences) were south-vergent, but in Paleo-Alpine (Cretaceous) evolution there were north-vergent. So, within the Western Carpathians in the case of terminating Variscan orogeny the Paleo-Tatric-Veporic lithospheric slice was thrust over the Paleo-Gemic one (Fig. 1C), causing the thermal consequences of the Permian metamorphic core complex overheating (Fig. 1D), though in the Late Cretaceous time it was of opposite geometry - north-vergent thrusting (Fig. 1F) caused the burial of (at least) South-Veporic zone beneath the overthrust Gemicum (and further superficial nappes), causing the thermal consequences of originating metamorphic core complex in Veporicum (Fig. 1G). Therefore the ore veins in Gemicum are dominantly Permian in age (with possible unimportant rejuvenation/remobilization in the Late Cretaceous), but the Late Cretaceous metallogenetic processes are preferably located in the South-Veporic zone.

Throughout the whole evolution of the Western Carpathians we interpret the important role of the convection heat of elongated linear shape along the orogenic belt, which principally contributed to riftogeneous (Variscan as well as Paleo-Alpine) sea-floor spreading (cf. Yoshida and Santosh, 2011, Fig. 3 *ibid.*; Maruyama et al., 2007), but also magnified the thermal consequences and metallogeny related to (Variscan and Paleo-Alpine) metamorphic core complexes.

Mineral deposits of public importance (MDoPI) represent a new category of mineral deposits, being defined in the frame of recent EU mineral supply policy to provide the raw materials security and by this way to allow the suf-

ficient access to explore and exploit minerals. Our paper intended to emphasize the fact that parallel to harmonized European regulatory/guidance/policy framework, there is necessary to have in mind that especially the natural conditions - geological (geodynamic) processes - represent the primary factor for the origin of economic mineral accumulations, including those being ranked as the mineral deposits of public importance.

Acknowledgement

Authors acknowledge the research possibilities on numerous regional and metallogenetic projects funded by the Ministry of Environment of the Slovak Republic during the course of the last 20 years, especially the projects Update of geological structure of problematic areas in the Slovak Republic, Investigation of geological setting and compilation of geological maps in problematic areas of the Slovak Republic, Critical Raw Materials I and II, and recently also the EC Horizon 2020 project MINATURA 2020. The research grants APVV-0081-10 and APVV-15-0050, which supported geodynamic and petrological research, are appreciated, too.

References

- Abbreviations** (in alphanumeric order): **GS SR** – Geological Survey of Slovak Republic, **GÚDŠ** – Geological Institute of Dionýz Štúr, **SAS** – Slovak Academy of Sciences, **St. Geol. Inst. D. Štúr** – State Geological Institute of Dionýz Štúr
- ANDRUSOV, D., 1959: Geology of Czechoslovak Carpathians. Vol. 2. *Bratislava, SAS, 1 – 389.*
- ANDRUSOV, D., 1968: Grundriss der Tektonik der Nördlichen Karpaten. *Bratislava, SAS, 1 – 188.*
- BARTALSKÝ, B. & RADVANEC, M., 1993: Relations between minerals of the Fe-Zn-As-S and Fe-Ti-Mn-O element association in conditions of regional metamorphism, Rožňava-Turecká Ore Field, Spiš-Gemer Ore Mts., Eastern Slovakia. *Miner. slov., 25, 437 – 450.*
- BARTALSKÝ, J. (ed.), ILAVSKÝ, J., BARTALSKÝ, B., ČÍŠKO, V., GRECULA, P., HOCK, M., KELLNER, M., KLADIVÍK, E., MAGULA, R., NÁVESNÁK, D., POPREŇÁK, J., RADVANEC, M., SZABÓ, R. & ŽIFČÁK, F., 1993: Smolník – the town of the copper-ore mines. *Bratislava, Geocomplex, 1 – 368.*
- BEZÁK, V., 1994: Proposal of the new dividing of the West Carpathian crystalline based on the Hercynian tectonic building reconstruction. *Miner. slov., 26, 1 – 6.*
- BEZÁK, V., ŠEFARA, J., BIELIK, M. & KUBEŠ, P., 1997: Models of the Western Carpathian lithosphere. In: Grecula, P., Hovorka, D. & Putiš, M. (eds.): Geological evolution of the Western Carpathians. *Bratislava, Miner. slov. – Monogr., 25 – 34.*
- BEZÁK, V., JACKO, S., JANÁK, M., LEDRU, P., PETRIK, I. & VOZÁROVÁ, A., 1997: Main Hercynian lithotectonic units of the Western Carpathians. In: Grecula, P., Hovorka, D. & Putiš, M. (eds.): Geological evolution of the Western Carpathians. *Bratislava, Miner. slov. – Monogr., 261 – 268.*

- BEZÁK, V. (ed.), BROSKA, I., ELEČKO, M., HAVRILA, M., IVANIČKA, J., JANOČKO, J., KALIČIAK, M., KONEČNÝ, V., LEXA, J., MELLO, J., PLAŠIENKA, D., POLÁK, M., POTFAJ, M. & VASS, D., 2004: Explanations to the tectonic map of Slovak Republic 1 : 500 000. *Bratislava, St. Geol. Inst. D. Štúr*, 71.
- BEZÁK, V. (ed.), BROSKA, I., IVANIČKA, J., POLÁK, M., POTFAJ, M., BUČEK, S., JANOČKO, J., KONEČNÝ, V., KALIČIAK, M., ŠIMON, L., ELEČKO, M., FORDINÁL, K., NAGY, A., MAGLAY, J. & PRISTAŠ, J., 2009: Explanations to general geological map of Slovak Republic 1 : 200 000. *Bratislava, St. Geol. Inst. D. Štúr*, 1 – 534.
- BIELY, A., 1989: The geological structure of the West Carpathians. In: Rakús, M., Dercourt, J. & Nairn, A. E. M. (eds.): Evolution of the northern margin of Tethys. Vol. II. *Mém. Soc. géol. France, Nouv. Sér.*, 154 (II), 51 – 57.
- BIELY, A., BEZÁK, V., ELEČKO, M., GROSS, P., KALIČIAK, M., KONEČNÝ, V., LEXA, J., MELLO, J., NEMČOK, J., POTFAJ, M., RAKÚS, M., VASS, D., VOZÁR, J. & VOZÁROVÁ, A., 1996: Explanations to geological map of Slovakia 1 : 500 000. *Bratislava, GS SR, Dionýz Štúr Publ.*, 1 – 77.
- BUCK, W. R. & TOKSÓZ, M. N., 1983: Thermal effects of continental collisions: Thickening a variable viscosity lithosphere. *Tectonophysics*, 100, 53 – 69.
- DOGLIONI, C., HARABAGLIA, P., MERLINI, S., MONGELLI, F., PECCERILLO, A. & PIROMALLO, C., 1999: Orogens and slabs vs. their direction of subduction. *Earth Sci. Rev.*, 45, 167 – 208.
- GRECULA, P., 1982: Gemericum – segment of the Paleotethyan riftogeneous basin. *Bratislava, Alfa*, 1 – 263.
- GRECULA, P., RADVANEC, M. & BARTALSKÝ, B., 1991: Critical thermic isograds in metamorphic-hydrothermal model of vein mineralization on the background of the Variscan events; Gemeric unit, Western Carpathians. *Miner. slov.*, 23, 403 – 411.
- GRECULA, P. (RED.), ABONYI, A., ABONYIOVÁ, M., ANTAŠ, M., BARTALSKÝ, B., BARTALSKÝ, J., DIANIŠKA, I., DRNÍK, E., ĎUĐA, R., GARGULÁK, M., GAZDÁČKO, Ľ., HUDÁČEK, J., KOBULSKÝ, J., LÖRINZ, L., MACKO, J., NÁVESNÁK, D., NÉMETH, Z., NOVOTNÝ, L., RADVANEC, M., ROJKOVIČ, I., ROZLOŽNÍK, L., ROZLOŽNÍK, O., VARČEK, C. & ZLOCHA, J., 1995: Mineral deposits of the Slovak Ore Mountains. Vol. 1. *Bratislava, Geocomplex*, 1 – 829.
- GRECULA, P. & NÉMETH, Z. (eds.), 1996: Variscan metallogeny in the Alpine orogenic belt. Monogr. *Bratislava, Geocomplex*, 1 – 313.
- GRECULA, P., HOVORKA, D. & PUTIŠ, M. (eds.), 1997: Geological evolution of the Western Carpathians. *Bratislava, Geocomplex*, 1 – 370.
- HARANGI, S. & LENKEY, L., 2007: Genesis of the Neogene to Quaternary volcanism in the Carpathian-Pannonian region: Role of subduction, extension, and mantle plume. *Geol. Soc. Amer., Spec. Pap.*, 418, 67 – 92.
- HARANGI, SZ., DOWNES, H., THIRLWALL, M. & GMÉLING, K., 2007: Geochemistry, petrogenesis and geodynamic relationships of Miocene calc-alkaline volcanic rocks in the Western Carpathian arc, Eastern Central Europe. *J. Petrology*, 48, 12, 2 261 – 2 287.
- HARRIS, N. B. W., KELLEY, S. & OKAY, A. I., 1994: Post-collision magmatism and tectonics in northwest Anatolia. *Contr. Mineral. Petrology*, 117, 241 – 252.
- HATÁR, J., HRAŠKO, Ľ. & VÁCLAV, J., 1989: Hidden granite intrusion near Rochovce with Mo-(W) stockwork mineralization (first object of its kind in the West Carpathians). *Geol. Zbor. Geol. carpath.*, 40, 5, 621 – 654.
- HÓK, J., ŠUJAN, M. & ŠÍPKA, F., 2014: Tectonic division of the Western Carpathians: An overview and a new approach. *Acta Geol. Slov.*, 6, 2, 135 – 143.
- HOVORKA, D., IVAN, P., JAROŠ, J., KRATOCHVÍL, M., REICHWALDER, P., ROJKOVIČ, I., SPIŠIAK, J. & TURANOVÁ, L., 1985: Ultramafic Rocks of the Western Carpathians (Czechoslovakia). Monogr. *Bratislava, GÚDŠ*, 1 – 258.
- HRAŠKO, Ľ., BEZÁK, V. & MOLÁK, B., 1997: Postorogenic peraluminous bimicaceous granites and granite porphyries in the Kohút zone of Veporicum (Klenovec-Zlatno area). *Miner. slov.*, 29, 113 – 135.
- HSÜ, K. J. & BERNOULLI, D., 1977: Genesis of the Tethys and the Mediterranean. Initial Rep. Deep Sea drill. *Proj.*, XLII (1), 943 – 949.
- HURAI, V., HARČOVÁ, E., HURAI OVÁ, M., OZDÍN, D., PROCHASKA, W. & WIEGEROVÁ, V., 2002: Origin of siderite veins in the Western Carpathians I. P-T-X- $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{18}\text{O}$ relations in ore-forming brines of the Rudňany deposits. *Ore Geol. Rev.*, 21, 67 – 101.
- HURAI, V., HURAI OVÁ, M., KODÉRA, P., PROCHASKA, W., VOZÁROVÁ, A. & DIANIŠKA, I., 2011: Fluid inclusion and stable C-O isotope constraints on the origin of metasomatic magnesite deposits of the Western Carpathians, Slovakia. *Russ. Geol. Geophys.*, 52, 1 474 – 1 490.
- HVOŽĎARA, P., 1967: The gold-scheelite mineralization in the middle part of Veporic. *Geol. Práce, Spr.*, 41, 167 – 172.
- ILAVSKÝ, J. & MALJKOVIČ, J. (eds.), 1980: Antimonite ore mineralizations of Czechoslovakia. *Bratislava, GÚDŠ*, 1 – 174.
- ILAVSKÝ, J. & SATTRAN, V., 1980: Explanations to metallogenic map of Czechoslovakia 1 : 500 000. *Bratislava, GÚDŠ*, 1 – 144.
- JAUPART, C. & PROVOST, A., 1985: Heart focussing, granite genesis and inverted metamorphic gradients in continental collision zones. *Earth planet. Sci. Lett.*, 73, 385 – 397.
- JERÁBEK, P., STÜNTZ, H., HEILBORNNER, R., LEXA, O. & SCHULMANN, K., 2007: Microstructural-deformation record of an orogen-parallel extension in the Vepor Unit, West Carpathians. *J. struct. Geol.*, 29, 1 722 – 1 743.
- KLINEC, A., MACEK, J. & DÁVIDOVÁ, Š., 1980: Rochovce granite in continuous zone between Gemeric and Veporic zone. *Geol. Práce, Spr.*, 74, 103 – 112.
- KONEČNÝ, V., KOVÁČ, M., LEXA, J. & ŠEFARA, J., 2002: Neogene evolution of the Carpatho-Pannonian region: An interplay of subduction and back-arc diapiric uprise in the mantle. *EGS Spec. Publ. Ser.*, 1, 165 – 194.
- KOSSMAT, F., 1927: Gliederung des varistischen Gebirgsbaus. *Abh. Sächs. geol. Landesamst.*, 1, 1 – 39.
- KOVÁČ, M. & MÁRTON, E., 1998: To rotate or not to rotate: Palinspastic reconstruction of the Carpatho-Pannonian area during the Miocene. *Slovak Geol. Mag.*, 4, 2, 75 – 85.
- KOZUR, H. & MOCK, R., 1996: New paleogeographic and tectonic interpretations in the Slovakian Carpathians and their implications for correlations with the Eastern Alps. Part I: Central Western Carpathians. *Miner. slov.*, 28, 151 – 174.
- KOZUR, H. & MOCK, R., 1997: New paleogeographic and tectonic interpretations in the Slovakian Carpathians and their implications for correlations with the Eastern Alps. Part II: Inner Western Carpathians. *Miner. slov.*, 29, 164 – 209.
- KRIST, E., KORIKOVSKY, S. P., PUTIŠ, M., JANÁK, M. & FARYAD, S. W., 1992: Geology and Petrology of Metamorphic Rocks of

- the Western Carpathian Crystalline Complexes. *Bratislava, Comenius University Press*, 324 p.
- KYTKOVÁ, B., TOMEK, Č., BIELIK, M. & PUTIŠ, M., 2007: Interpretation of deep seismic reflection profiles in the northern part of the Malé Karpaty Mountains. *Contr. Geophys. Geod.*, 37, 1, 43 – 58.
- LEŠKO, B., ŠUTORA, A. & PUTIŠ, M., 1988: Geology of the Považský Inovec horst based on geophysical investigation. *Geol. Zbor. Geol. carpath.*, 39, 2, 195 – 2016.
- LEXA, J. & KONEČNÝ, V., 1998: Geodynamic aspects of the Neogene to Quaternary volcanism. In: Rakús, M. (ed.): Geodynamic development of the Western Carpathians. *Bratislava, GS SR, Dionýz Štúr Publ.*, 219 – 240.
- LEXA, J., BAČO, P., HURAI, V., CHOVAN, M., KODÉRA, P., PETRO, M., ROJKOVIČ, I. & TRÉGER, M., 2007: Explanatory notes to the metallogenetic map of Slovak Republic 1 : 500 000. *Bratislava, ŠGÚDŠ*, 1 – 178.
- MAHEL, M. & BUDAY, T. (eds.), CÍCHA, I., FUSÁN, O., HANZLÍKOVÁ, E., CHMELÍK, F., KAMENÍČKÝ, J., KORÁB, T., KUTHAN, M., MATĚJKA, A., NEMČOK, J., PÍCHA, F., ROTH, Z., SENEŠ, J., SCHEIBNER, E., STRÁNIK, Z., VAŠKOVSKÝ, I. & ŽEBERA, K., 1968: Regional geology of Czechoslovakia. Part II. The West Carpathians. *Praha, Geol. Surv. Czechoslov. Academia*, 1 – 723.
- MAHEL, M. (ed.), 1979: Tectonic profiles through the West Carpathians. *Bratislava, GÚDŠ*, 1 – 238.
- MAHEL, M., 1986: Geological structure of Czechoslovak Carpathians. Part 1: Palealpine units. *Bratislava, Veda*, 1 – 503.
- MÁRTON, E. & FODOR, L., 1995: Combination of palaeomagnetic and stress data – a case study from North Hungary. *Tectonophysics*, 242, 99 – 114.
- MARUYAMA, S., SANTOSH, M. & ZHAO, D., 2007: Superplume, supercontinent, and post-perovskite: Mantle dynamics and anti-plate tectonics on the core-mantle boundary. *Gondwana Res.*, 11, 7 – 37.
- MELLO, J. (ed.), ELEČKO, M., PRISTAŠ, J., REICHWALDER, P., SNOPO, L., VASS, D., VOZÁROVÁ, A., GAÁL, L., HANZEL, V., HÓK, J., KOVÁČ, P., SLAVKAY, M. & STEINER, A., 1997: Explanations to geological map of the Slovak Karst 1 : 50 000. *Bratislava, GS SR, Dionýz Štúr Publishers*, 1 – 255.
- MELLO, J., REICHWALDER, P. & VOZÁROVÁ, A., 1998: Bôrka Nappe: high-pressure relic from the subduction-accretion prism of the Meliata ocean (Inner Western Carpathians, Slovakia). *Slovak Geol. Mag.*, 4, 4, 261 – 273.
- MISSONI, S. & GAWLICK, H.-J., 2011: Jurassic mountain building and Mesozoic-Cenozoic geodynamic evolution of the Northern Calcareous Alps as proven in the Berchtesgaden Alps (Germany). *Facies*, 57, 137 – 186.
- MUTTONI, G., CAETANI, M., KENT, D. V., SCIUNNACH, D., ANGIOLINI, L., BERRA, F., GARZANTI, E., MATTEI, M. & ZANCHI, A., 2009: Opening of the Neo-Tethys Ocean and the Pangea B to Pangea A transformation during the Permian. *GeoArabia*, 14, 4, 17 – 48.
- NÉMETH, Z., 2002: Variscan suture zone in Gemericum: Contribution to reconstruction of geodynamic evolution and metallogenetic events of Inner Western Carpathians. *Slovak Geol. Mag.*, 8, 3 – 4, 247 – 257.
- NÉMETH, Z., 2005: Geodynamic evolution of Gemericum and neighbouring Veporicum in the frame of two-phase divergence and convergence. *Miner. slov.*, 37, 3, 202 – 204.
- NÉMETH, Z., PROCHASKA, W., RADVANEC, M., KOVÁČIK, M., MADARÁS, J., KODÉRA, P. & HRAŠKO, L., 2004: Magnesite and talc origin in the sequence of geodynamic events in Veporicum, Inner Western Carpathians, Slovakia. *Acta Petrol. Sin.*, 20, 837 – 854.
- NÉMETH, Z., RADVANEC, M., GAZDAČKO, L. & KOBULSKÝ, J., 2012a: Variscan tectonic setting vs. Alpine overprint in Gemericum (Inner Western Carpathians): Their role in the recent distribution of tectonic units in the eastern part of the territory as expressed in significant localities. *Miner. slov.*, 44, 1, *Geovestník*, 8 – 15.
- NÉMETH, Z. & RADVANEC, M., 2012b: Rakovec geosuture in Gemericum: Variscan exhumation vs. Alpine translation and imbrication overprint in the North Gemeric zone. *Mineralia Slov.*, 44, 4, *Geovestník*, 10 – 11.
- NÉMETH, Z., RADVANEC, M. & SMOLÁRIK, M., 2015: Metallogenesis in the region of Gemeric unit (Western Carpathians) as a product of the sequence of tectonometamorphic events. *Proceedings from the Open Congress of the Czech and Slovak geological societies, Mikulov, Czech Republic*, 14 – 17 October 2015.
- PETRÍK, I., KOHÚT, M., BROSKA, I. (eds.), BEZÁK, V., HRAŠKO, L., JANÁK, M., PLAŠIENKA, D., UHER, P., POLLER, U., TODT, W., NABELEK, P. & RECIO, C., 2001: Granitic plutonism of the Western Carpathians: characteristics and evolution. Excursion guide to EUROGRANITES 2001, Western Carpathians, Slovakia, September 16, 2001. *Bratislava, Veda, vyd. SAV*, 116.
- PLAŠIENKA, D., GREČULA, P., PUTIŠ, M., KOVÁČ, M. & HOVORKA, D., 1997: Evolution and structure of the Western Carpathians: An overview. In: Grečula, P., Hovorka, D. & Putiš, M.: Geological evolution of the Western Carpathians. *Bratislava, Miner. slov. – Monogr.*, 1 – 24i.
- PUTIŠ, M., 1992: Variscan and Alpidic nappe structures of the Western Carpathian crystalline basement. *Geol. Carpath.*, 43, 369 – 380.
- PUTIŠ, M., 1994: South Tatric-Veporic basement geology: Variscan nappe structures; Alpine thick-skinned and extensional tectonics in the Western Carpathians (Eastern Low Tatra Mountains, Northwestern Slovak Ore Mountains). *Mitt. Österr. geol. Gesell.*, 86, 83 – 99.
- PUTIŠ, M., SERGEEV, S., ONDREJKA, M., LARIONOV, A., SIMAN, P., SPIŠIAK, J., UHER, P. & PADERIN, I., 2008: Cambrian-Ordovician metaigneous rocks associated with Cadomian fragments in the West-Carpathian basement dated by SHRIMP on zircons: a record from the Gondwana active margin setting. *Geol. Carpath.*, 59, 3 – 18.
- PUTIŠ, M., IVAN, P., KOHÚT, M., SPIŠIAK, J., SIMAN, P., RADVANEC, M., UHER, P., SERGEEV, S., LARIONOV, A., MÉRES, Š., DEMKO, R. & ONDREJKA, M., 2009a: Metaigneous rocks of the West-Carpathian basement, Slovakia: indicators of Early Paleozoic extension and shortening events. *Bull. Soc. géol. France*, 180, 461 – 471.
- PUTIŠ, M., FRANK, W., PLAŠIENKA, D., SIMAN, P., SULÁK, M. & BIRÓN, A., 2009b: Progradation of the Alpidic Central Western Carpathians orogenic wedge related to two subductions: constrained by ⁴⁰Ar/³⁹Ar ages of white micas. *Geodinamica Acta*, 22, 31 – 56.
- PUTIŠ, M., DANIŠÍK, M., RUŽIČKA, P. & SCHMIEDT, I., 2014: Constraining exhumation pathway in an accretionary wedge by

- (U-Th)/He thermochronology – Case study on Meliatic nappes in the Western Carpathians. *J. Geodynam.*, 81, 80 – 90.
- RADVANEČ, M., 1994: Crystallization sequence under partial crust melting in extensive regime on the example of granite generation in Ochtiná and Rochovce area (Western Carpathians). *Miner. slov.*, 26, 1, 373 – 386.
- RADVANEČ, M., 1999: Eclogitized clinopyroxene gabbro with retrograde metamorphism in pumpellyite-actinolite facies on Babiná and Ostrá hills (Gemericum). *Miner. slov.*, 31, 467 – 484.
- RADVANEČ, M. & GREČULA, P., 1985: Geochemical anomalies of tin and molybdenum in the ore-bearing volcanic horizon of the Gemeric Lower Paleozoic sequences (West Carpathians). *Miner. slov.*, 17, 6, 563 – 568.
- RADVANEČ, M. & BARTALSKÝ, B., 1987: Geochemical zoning of stratiform sulphide ore mineralization in the Smolník – Štós – Medzev area, Eastern Slovakia. *Miner. slov.*, 19, 443 – 455.
- RADVANEČ, M. & PROCHASKA, W., 2001: Successive replacement of Upper Carboniferous calcite to dolomite and magnesite in Dúbrava magnesite deposit (Western Carpathians, Slovakia). In: Radvanec, M., Gondim, A. C. & Németh, Z. (eds.): IGCP 443 Newsletter No. 1. *Miner. slov.*, 33, 517 – 525.
- RADVANEČ, M., NÉMETH, Z. & BAJTOŠ, P. (eds.), 2010: Magnesite and talc in Slovakia: Genetic and geoenvironmental models. Monogr. Bratislava, St. Geol. Inst. D. Štúr, 1 – 130.
- RADVANEČ, M., NÉMETH, Z., KRÁČ, J. & PRAMUKA, S., 2014: Gneiss-amphibolite complex of Gemericum – results of petrological and tectonic investigation. *Miner. slov.*, 46, 3 – 4, *Geovestník*, 24 – 25.
- RADVANEČ, M. & UHER, P., 2016: Platinum-group minerals in metapyroxenite from Jasov, Meliatic Unit, Slovakia. *Acta Geol. Slov.*, 8, 2, 195 – 201.
- RAKÚS, M. (ed.), 1998: Geodynamic development of the Western Carpathians. Bratislava, GS SR, 1 – 290.
- SCHMID, S. M., FÜGENSCHUH, B., KISSLING, E. & SCHUSTER, R., 2004: Tectonic map and overall architecture of the Alpine orogen. *Eclogae geol. Helv.*, 97, 93 – 117.
- SLAVKAY, M., BEŇKA, J., BEZÁK, V., GARGULÁK, M., HRAŠKO, L., KOVÁČIK, M., PETRO, M., VOZÁROVÁ, A., HRUŠKOVIČ, S., KNĚSL, J., KNĚSLOVÁ, A., KUSEIN, M., MAŤOVÁ, V. & TULIS, J., 2004: Mineral deposits of the Slovak Ore Mountains. Volume 2. Bratislava, St. Geol. Inst. D. Štúr, 1 – 282.
- STAMPFLI, G. M., 1996: The Intra-Alpine terrain: A Paleotethyan remnant in the Alpine Variscides. *Eclogae geol. Helv.*, 89, 1, 13 – 42.
- STAMPFLI, G. M. & KOZUR, H. W., 2006: Europe from the Variscan to the Alpine cycles. In: GEE, D. G. & STEPHENSON, R. A. (eds.): European Lithosphere Dynamics. *Mem. Geol. Soc. London*, 32, 57 – 82.
- SUESS, E., 1880: Über die vermeintlichen säcularen Schwankungen einzelner Theile der Erdoberfläche. *Verh. K.-Kön. Geol. Reichsanst.*, 11, 171 – 180.
- SZABÓ, S., NOVOTNÝ, L., BARTALSKÝ, B. & JURÍK, I., 2014: New knowledge about geology of the Košice I – Kurišková deposit (Slovakia). *Miner. slov.*, 46, 1 – 2, 59 – 68.
- ŠIMON, L., 2000: Volcanic structure of the youngest volcano in the Western Carpathians – the Pútkov vršok volcano. *Miner. slov.*, 32, 3, 241 – 242.
- ŠIMON, L. & MAGLAY, J., 2005: Dating of sediments from the footwall of the lava flow of Putikovo volcano using method of optically stimulated luminescence. *Miner. slov.*, 37, 3, 279 – 281.
- THOMPSON, A. B. & CONNOLLY, J. A. D., 1995: Melting of the continental crust: Some thermal and petrological constraints on anatexis in continental collision zones and other tectonic settings. *J. geophys. Res.*, 100, 138, 125, 565 – 579.
- TOMEK, Č., 1993: Deep crustal structure beneath the central and inner West Carpathians. *Tectonophysics*, 226, 417 – 431.
- UHER, P. & BROSKA, I., 1996: Post-orogenic Permian granitic rocks in the Western Carpathian-Pannonian area: Geochemistry, mineralogy and evolution. *Geol. Carpath.*, 47, 311 – 321.
- VON RAUMER, J. F., 1998: The Palaeozoic evolution in the Alps: from Gondwana to Pangea. *Geol. Rdsch.*, 87, 407 – 435.
- VON RAUMER, J. F. & STAMPFLI, G. M., 2008: The birth of the Rheic Ocean – Early Palaeozoic subsidence patterns and subsequent tectonic plate scenarios. *Tectonophysics*, 461, 9 – 20.
- VOZÁR, J., EBNER, F., VOZÁROVÁ, A., HAAS, J., KOVÁCS, S., SUDAR, M., BIELIK, M. & PÉRO, Cs. (eds.), 2010: Variscan and Alpine terranes of the Circum-Pannonian region. Bratislava, SAS, 1 – 233.
- VOZÁROVÁ, A., LEPEKHINA, E., VOZÁR, J. & RODIONOV, N., 2010: In situ U/Pb (SHRIMP) zircon age dating from the Permian volcanites of the Northern Veporicum. In: Kohút, M. (ed.): Dating 2010. Dating of minerals and rocks, metamorphic, magmatic and metallogenic processes, as well as tectonic events. *Konf., Symp., Sem. Bratislava, St. Geol. Inst. D. Štúr*, 1 – 49.
- YOSHIDA, M. & SANTOSH, M., 2011: Supercontinents, mantle dynamics and plate tectonics: A perspective based on conceptual vs. numerical models. *Earth Sci. Rev.*, 105, 1 – 24.

Podmienenosť metalogenézy geodynamickými procesmi – primárna podmienka vzniku ložísk nerastov verejného významu (MDoPI): prípadová štúdia zo Západných Karpát

Sumarizujúci článok poskytuje chronologický prehľad paleozoickej a kenozoickej riftogenézy, subdukčno-kolíznych a pokolíznych procesov v Západných Karpatoch a súvisiacich metalogenetických procesov. Kvôli lepšej paralelizácii s doteraz používanými klasifikáciami sa uvádza aj členenie metalogenetických produktov jednotlivých orogenetických fáz v zmysle Lexu et al. (2007).

V príspevku je zdôvodnené prednostné používanie termínu variský (miesto hercýnsky) pre paleozoické udalosti a ich produkty. V prípade tradičného členenia orogenézy a metalogenézy na paleo-, mezo- a neovariské (hercýnske) udalosti, rovnako ako paleo-, mezo- a neoalpinske udalosti, je v príspevku uprednostnená klasifikácia s priamymi názvami konkrétnych geodynamických udalostí orogenetických procesov (napr. variská alebo alpinska riftogenetická fáza, kolízna, resp. pokolízna fáza).

Pri analýze orogenetického vývoja Západných Karpát sme vyčlenili 10 podstatných vývojových období (obr. 1; A – J) a v rámci nich 4 hlavné metalogenetické periód. Podstatnú úlohu pri geodynamických procesoch a metalogenéze v Západných Karpatoch prisudzujeme lineárnemu zdroju konvekčného tepla s ekvatoriálnym priebehom (plášťový stĺpec – *mantle plume*; horúca línia – *hot line s. l.*), ktorý kontinuálne pôsobil od staršieho paleozoika až do kenozoika. Počas tohto dlhého obdobia lineárny zdroj konvekčného tepla spôsobil opakujúcu sa divergenciu v zóne s ekvatoriálnym priebehom naprieč Pangeou s viacnásobným oddelením Gondwany od Laurázie (Euroázie) a súvisiacimi metalogenetickými dôsledkami – stratiformnou a magmatogénnou mineralizáciou v pretiahnutých bazénoch divergentných zón. Konvergentné uzatváranie týchto bazénov sa končilo kolíziou litosférických platní a termálnymi dôsledkami zhrubnutia kontinentálnej kôry (*metamorphic core complex*), ktorých dôsledkom bola aj genéza metamorfnej/magmatogénnej mineralizácie.

V článku sú prezentované a schematicky vizualizované nasledujúce vývojové štádiá:

- A. Staropaleozoická variská riftogenetická fáza (paleohercýnska fáza v zmysle Lexu et al., 2007).
- B. Staropaleozoická kolízia v zóne paleotatika a paleoveporika, ktorá nasledovala po uzavretí prototetýdy (devón; 415–380 mil. rokov), a následná spodnokarbónska subdukcia (380–340 mil. rokov), v zmysle l. c. ide o predmezohercýnsku a mezohercýnsku orogenetickú fázu.
- C. Variská kolízia paleotatroveporického bloku s paleogemerickou zónou v karbone až vestfále (340–304 mil.

rokov), v zmysle klasifikácie l. c. ide o neohercýnsku neskoroogenetickú fázu.

- D. Variská pokolízna fáza s prídavkom plášťového tepla (nad horúcou líniou), metalogenéza v paleogemeriku a susediacom paleoveporiku (stefan – perm; 304–250 mil. rokov).
- E. Palealpinska riftogenetická fáza (vrchný perm – spodná jura; 260–180 mil. rokov), v zmysle klasifikácie l. c. ide o staršiu palealpinsku fázu.
- F. Palealpinska kolízna fáza (spodná jura – stredná krieda; 130–106 mil. rokov), palealpinska orogenetická fáza v zmysle l. c.
- G. Palealpinska pokolízna fáza s prídavkom tepla a metalogenézou (vrchná krieda; 106–70 mil. rokov), palealpinske neskoroogenetické štádium podľa l. c.
- H. Mezoalpinske pokolízne štádium/raná neoalpinska transpresia (paleogén; 70–24 mil. rokov), poorogenetická/staršia neoalpinska fáza v zmysle l. c.
- I. Neoalpinska fáza súvisiaca so subdukčným procesom (miocén; 24–10 mil. rokov), neoalpinske orogenetické štádium podľa l. c.
- J. Neoalpinska pokolízna fáza (pliocén – kvartér; 10–0 mil. rokov), neoalpinska postorogenetická fáza v zmysle l. c.

Prvá metalogenetická perióda súvisí so staropaleozoickými riftogenetickými udalosťami (A), druhá je dôsledkom permského prehriatia v dôsledku variskej pokolíznej evolúcie (C – D) vrátane regionálnej extenzie, magmatických a metalogenetických procesov, tretia metalogenetická perióda je produktom vrchnokriedového prehriatia ako dôsledku palealpinskej pokolíznej evolúcie (G) a štvrtá, neoalpinska metalogenetická perióda súvisí s miocénnymi magmaticko-vulkanickými procesmi ako dôsledkom tepelného toku z astenosféry vyklenutej dovrchu (I).

Ložiská nerastov verejného významu (*Mineral deposits of public importance* – MDoPI) reprezentujú novú kategóriu ložísk nerastov. Sú definované v rámci súčasnej surovinovej politiky EÚ s cieľom zabezpečiť surovinovú bezpečnosť a bezproblémovú realizáciu prieskumných prác a ťažby nerastných surovín. Cieľom článku je zdôrazniť, že paralelne s harmonizáciou legislatívy a surovinovej politiky v členských štátoch EÚ je nevyhnutné brať do úvahy aj prírodné podmienky – geologické (geodynamické) procesy, ktoré sú primárnou podmienkou vzniku ekonomických akumulácií surovín, a teda aj ložísk nerastov verejného významu.

Doručené / Received: 28. 10. 2016

Prijaté na publikovanie / Accepted: 15. 12. 2016

U/Pb SIMS zircon dating of a rhyolite intercalation in Permian siliciclastics as well as a rhyodacite dyke in micaschists (Infrataticum, W. Carpathians)

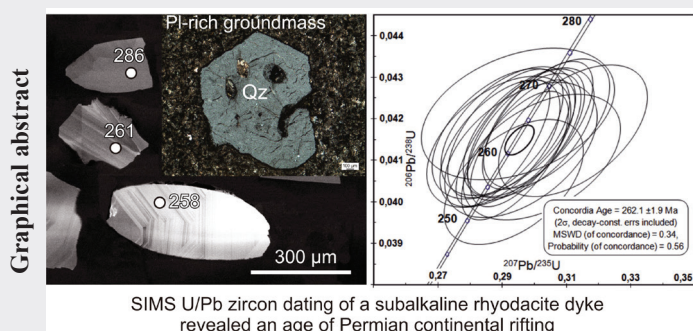
MARIÁN PUTIŠ¹, JIAO LI², PETER RUŽIČKA¹, XIAOXIAO LING²
and ONDREJ NEMEC¹

¹Comenius University, Faculty of Natural Sciences, Ilkovičova 6, SK-842 15 Bratislava, Slovakia;
putis@fns.uniba.sk

²State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract: The Infratatic Inovec Nappe in northern part of the Považský Inovec Mts. (Central Western Carpathians) is built of basement kyanite(sillimanite-andalusite)-garnet micaschists to gneisses, which are covered by the lithologically variable siliciclastic Late Carboniferous and Permian sediments. The U/Pb SIMS zircon ages of a rhyolite as well as surrounding pyroclastics, present as intercalations in Permian siliciclastic sediments, were compared with the age of a rhyodacite dyke crosscutting the basement micaschist gneisses. Despite reported differences in the petrographic and chemical (major elements) composition of dated volcanic rocks, the obtained U/Pb SIMS zircon ages are unified in a narrow time interval from ca 267 to 262 Ma, indicating a relatively short-lived volcanic event. Similarly, the normalized REE and multielement (spider) trace element diagrams with slightly enriched LREE and rather low Y (Yb, Nb, Ta) content as well as weak Eu anomaly could indicate an arc-type volcanic rocks. Rhyodacite dyke however, showing no fractionation (no Eu anomaly), approaching primary quartz diorite/tonalite melt composition, suggests the within plate acid volcanism. Such kind of volcanism is typical for the Pangea continental margin breakdown and rift-related volcanism. Also this feature, besides the grade of Alpine tectonometamorphic overprint, strongly differentiates the Infratatic Unit from the overlying Tatic Unit.

Key words: acid volcanic rocks, zircon, U/Pb SIMS, Infrataticum, Western Carpathians



- Highlights**
- Petrography and geochemistry of Permian acid volcanic rocks of the Infratatic Unit, Western Carpathians
 - U/Pb SIMS zircon Guadalupian (Wordian to Capitanian) ages of acid volcanic rocks
 - Continental volcanic arc- and within-plate type geodynamic setting

Geological setting

The Infratatic (IFTA) Unit (Putiš, 1992) of the Central Western Carpathians is a basement/cover structural complex overridden by the Tatic Unit along the Hrádok-Zlatníky thrust-fault zone, the latter unit later (after Turonian) being overthrust by the Fatic and Hronic nappes. The Infratatic Unit was called Carpathian Penninic by Leško et al. (1988), because the Tatic Unit was considered analogous to the Lower Austroalpine Unit underlain with the Penninic Unit in the Eastern Alps (e.g. Tollmann, 1980).

The IFTA Unit is composed of the higher Inovec and the lower Belice nappes, exposed in the Miocene horst of the Považský Inovec Mts. (Fig. 1). The Inovec Nappe micaschist-gneiss basement is covered by the Late Carboniferous to Middle Triassic sedimentary rocks (Putiš, 1983). Much complete Permian to Early Cretaceous Humienec Succession was reconstructed from the underlying Belice Nappe, where the Late Cretaceous hemipelagic and pelagic clayey, cherty-clayey and flysch sediments (Kullmanová and Gašparíková, 1982; Plašienka et al., 1994; Putiš et al., 2006, 2008) contain large slices and olistolith blocks

derived from this succession. Plašienka (2012) considers the whole succession of the Belice Nappe more or less stratigraphically continuous (the Humienec unit by Putiš in Leško et al., 1988), representing the Váhic Oceanic Unit, despite a true oceanic crust with N-MORB has not been found. The Middle/Late Jurassic to Early Cretaceous members of this succession occur as clasts to olistolith fragments refolded with flysch. The reported “continuity” from the Early to Late Cretaceous is however broken due to a mid-Cretaceous tectonometamorphic event. Different metamorphic grade was found between the Permian to Early Cretaceous siliciclastic or volcanic fragments in the flysch sequence on the one hand, and the Late Cretaceous Couches-Rouges type and flysch shaly sediments on the other hand (Putiš, 1986; Putiš et al., 2006, 2008; Sulák et al., 2009). Therefore a hiatus between the reconstructed Permian to Early Cretaceous Humienec Succession and the Late Cretaceous Belice Succession should be taken into account. Pelech et al. (2016) consider a continuation of the Gosau-type sediments from the Brezová Mts. eastwards up to the “Tatricum” of the Považský Inovec Mts. Selec Block.

The Inovec Nappe is overthrust with the Tatric Unit overloaded with the Mesozoic Fatric and Hronic nappes (Plašienka et al., 1997). In fact, this is a Miocene tectonic window dated to 21–13 Ma by the apatite fission-track (FT) ages (Danišík et al., 2004). The only exception is the southernmost Považský Inovec Mts. Hlohovec Block, which yielded apatite FT age of 41 Ma, compatible with the apatite cooling ages (below ca. 125–100 °C) from 44 to 35 Ma also determined in the Malé Karpaty and Tribeč Mts. (Danišík et al., 2004). Only rare exposures of Paleogene formations covering the Tatric Panská Javorina Nappe including the overlying Hronic (Choč) Nappe are preserved in the study area. The IFTA Inovec Nappe lacks the Paleogene sediments, because at that time it was underneath the Tatric Unit overloaded with the Mesozoic Fatric and Hronic nappes as a lid. The Fatric and Hronic nappe fragments may have been gravitationally slid on the already being exhumed IFTA Unit most likely since the Paleogene-Neogene boundary period.

Termination of the Eocene tectonometamorphic overprint (Putiš et al., 2006, 2008), dated by newly formed celadonite-poor muscovite (3.1–3.2 Si pfu; Sulák et al., 2009) $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ plateau age of 48 ± 2 Ma from the Tatric Unit hanging wall greenschist-facies granite blastomylonites (ca 300 °C at minimum 4–5 kbar; Putiš et al., 2009; 25 °C/km gradient), is registered in zircon FT cooling ages (below ca 250–200 °C) of 47–37 Ma from the Inovec Nappe, according to unpublished data set. This event was also detected in a basalt olistolith from the Late Cretaceous flysch close to Humienec Hill by the whole-rock K/Ar age of 46 ± 3 Ma (Putiš et al., 2008). The Cenomanian to Maastrichtian Belice Basin closed and the lower IFTA Belice

Nappe has formed being part of the growing Cretaceous–Eocene accretionary wedge most likely due to foreland Magura Unit heavy crust southward subduction.

The lowest anchimetamorphic conditions were achieved in the lower IFTA Belice Nappe underthrust below the higher IFTA Inovec Nappe, being overloaded with the Tatric, Fatric and Hronic nappes. The Belice Nappe Couches-Rouges type shales and flysch sediments contain newly formed white mica (3.13–3.29 Si pfu) of illite-phengite composition with the very low (K+Na) values from 0.5 to 0.7 pfu and K_2O from 5 to 7 wt.%, being typical for the diagenesis, but also for the lowest-temperature metamorphic overprint (150–200 °C at 4–5 kbar; ca 12 °C/km gradient).

However, the basement micaschists and the Late Carboniferous to Early Cretaceous cover rocks (including the reconstructed Humienec Succession) of the Inovec Nappe show an older, mid-Cretaceous, higher-temperature and medium-pressure anchi-metamorphic overprint reported by Putiš (1981, 1986), Korikovsky and Putiš (1999), Putiš et al. (2006, 2008) and Sulák et al. (2009). For example, the presence of illite-phengite (3.21–3.45 Si pfu) with (K+Na) values from 0.7 to 0.8 pfu and K_2O from 8 to 9 wt.% in the Early Cretaceous slates (clast to km-size fragments in late Santonian to Maastrichtian flysch) indicates medium-anchimetamorphic conditions of 200–270 °C at minimum medium pressure of 5–6 kbar (Putiš et al., 2008; Sulák et al., 2009) or burial to ca 15–20 km depth (15 °C/km gradient). The newly formed white mica of metamorphic illite-phengite to normal phengite (=celadonite-rich muscovite) composition, yielded $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ plateau ages of 114.0 ± 2.4 and 106.2 ± 3.7 Ma (Putiš et al., 2009), constraining well a late Early Cretaceous (“mid-Cretaceous”) metamorphic event. The age of 101.2 ± 2.9 Ma was directly obtained from the Permian meta-sandstone phengite (sample PI-4, Hôrka Valley), 1 km to NW of dated meta-rhyolite body (samples PI-R11a, b). These $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages are coeval with the termination of the Jurassic–Early Cretaceous Humienec Basin Succession and an accretionary wedge formation in front of the Tatric Unit. The underthrusting of the IFTA Inovec Nappe below the north-Tatric nappes is recorded by the age of 102.3 ± 1.9 Ma from the Tatric Unit hanging wall granite blastomylonite white micas. The metamorphosed rocks of this Cretaceous wedge are represented by the higher IFTA Inovec Nappe, recently exposed north of the Hrádok-Zlatníky line (= the thrust fault of the Tatric Unit over the IFTA Unit), including inferred frontal Humienec tectonic slice composed of Permian to Early Cretaceous Humienec Succession, the rock fragments of which exclusively occur in the Late Cretaceous flysch (Putiš et al., 2008). The outlined metamorphic gradients in this syn-orogenic accretionary wedge (Putiš et al., 2008) are typical for the subduction related accretionary wedges (Peacock, 1987; Platt, 1993).

The Permian siliciclastics of the Inovec Nappe contain numerous prolonged lensoidal km-size bodies of basic and acid volcanic rocks discovered and mapped by Putiš (1981, 1986) in a wider area E of Hôrka nad Váhom village, between Hrádocká and Krajná valleys in the middle part of the mountains (Fig. 1; see also Geological Map of the Považský Inovec Mts., Ivanička et al., 2007). Smaller bodies of basic and acid volcanics in Permian siliciclastics occur as infolded ones in the basement micaschist-gneisses NE of Čierny Hill. A rhyodacite dyke crosscuts micaschist-gneisses N of Inovec Hill. Polák (1956) called this rhyodacite dyke dacite, and Hovorka (1960) as quartz porphyrite. Next dykes of this type were found by Putiš (1981) to the W and N of Inovec Hill (Fig. 1), which suggests a presence of the rhyodacite dyke swarm. Similar basic and acid volcanic rocks are known from olistoliths in the Late Cretaceous red clayey, cherty-clayey and flysch sediments of the Belice Succession (Putiš et al., 2006, 2008), e.g. close to Humienec Hill or NE of Hradisko Hill (Fig. 1).

The aim of this paper is to present new U/Pb SIMS zircon ages from a rhyolite body in the Permian siliciclastics from the wider area of Hôrčanská dolina Valley and to compare these ages with the age of rhyodacite dyke emplaced in micaschist-gneiss basement rocks, covered by the Permian volcano-sedimentary rocks. Additional information concerns a brief petrographic and geochemical characteristics used for geodynamic interpretation of dated volcanic rocks.

Methodics

The choice of samples for radiometric dating was done on the basis of own mapping and publications (Putiš, 1981 – 1986; Putiš et al., 2006, 2008). The GPS sample location: PI-RD1 N 48°47.500', E 18°03.229', 796 m a.s.l.; PI-R11a N 48°42.972', E 17°57.314', 380 m a.s.l.; PI-R11b N 48°42.972', E 17°57.314', 380 m a.s.l.

The samples were crushed to fine-grained fractions used for zircon separation finally under a binocular at the Earth Science Institute of Slovak Academy

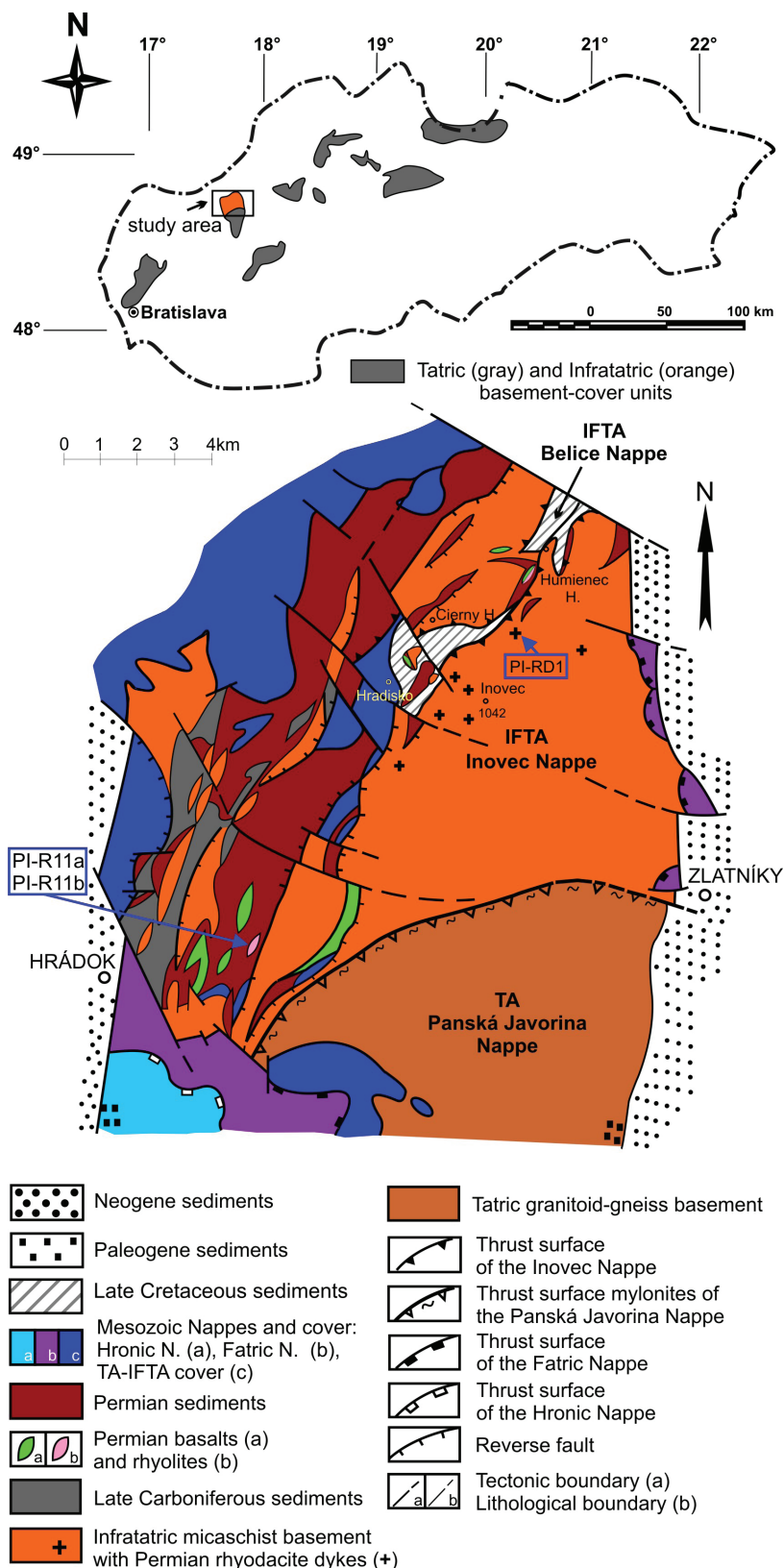


Fig. 1. Geological map of the Považský Inovec Mountains (after Putiš, 1981, 1983, 1986; Putiš in Krist et al., 1992, completed) with dated samples location. TA = Tatric Unit, IFTA = Infratatic Unit.

of Sciences in Banská Bystrica. The pulp samples were analysed for major, trace, and rare earth element (REE) contents, as well as for total carbon, sulfur, and loss-on-ignition (LOI) in ACME Laboratories Ltd. in Vancouver in Canada. Two instruments for inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES) and inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) were used for the whole-rock geochemical analyses (Tab. 1).

Zircon crystals were mounted in a transparent epoxy and polished in order to expose the fresh interior of the crystals. An epoxy mount was coated with high-purity gold to reach b20 Ω resistance prior to SIMS analysis. Images of zircon crystals under translucent and reflective light and CL images were available for careful spot choice avoiding fractures and inclusions. Measurement of U/Pb analyses of zircons were performed using Cameca IMS-1280HR SIMS at Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences in Beijing. The complete Instrument description and analytical procedure can be found in Li et al. (2009). The O_2^- primary ion beam was approximately $20 \times 30 \mu m$ in size. Positive secondary ions were extracted with a 10 kV potential. A mass resolution of ca. 5400, defined at 10 % peak height was used to separate Pb^+ peaks from isobaric interferences. A single electron multiplier was used in ion-counting mode to measure secondary ion beam intensities by peak jumping mode. Pb/U calibration was performed relative to zircon standard Plešovice ($^{206}Pb/^{238}U$ age = 337 Ma, Sláma et al., 2008). U and Th concentrations were calibrated against zircon standard 91500 (Th = 29 ppm, and U = 81 ppm, Wiedenbeck et al., 1995). Measured compositions were corrected for common Pb using non-radiogenic ^{204}Pb . Corrections are sufficiently small to be insensitive to the choice of common Pb composition, and an average of the present-day crustal composition (Stacey and Kramers, 1975) is used for the common Pb assuming that the common Pb is largely surface contamination introduced during sample preparation. In order to monitor the external uncertainties of SIMS U-Pb zircon dating calibrated against Plešovice standard, a zircon standard Qinghu was alternately analysed as one of the unknowns. Twenty-two measurements on Qinghu zircon yield a Concordia age of 160 ± 1 Ma, which is identical within an error with the recommended value of 159.5 ± 0.2 Ma (Li et al., 2013). Analytical uncertainties were within 2 %. Concordia U-Pb ages are quoted with 95 % confidence interval. All Concordia ages and diagrams were generated using Isoplot/Ex v. 2.49 program (Ludwig, 2001).

Obtained results

The meta-rhyolite (sample PI-R11a) from the Hôrčanská Valley area belongs to Permian cover of the IFTA Inovec Nappe. The narrow about 20 metre exposed wide body

Tab. 1
The whole-rock chemical analyses of studied samples. MDL – the minimum detection limits.

Sample		PI-R11a	PI-R11b	PI-RD-1
wt. %	MDL			
SiO ₂	0.01	76.94	72.04	57.63
TiO ₂	0.01	0.11	0.31	1.51
Al ₂ O ₃	0.01	11.69	13.87	16.08
Cr ₂ O ₃	0.002	<0.002	<0.002	0.025
Fe ₂ O ₃	0.04	0.56	2.67	8.48
MnO	0.01	0.04	0.04	0.06
MgO	0.01	0.05	0.44	5.66
CaO	0.01	1.94	1.04	0.74
Na ₂ O	0.01	6.36	5.36	3.54
K ₂ O	0.01	0.21	0.16	1.67
P ₂ O ₅	0.01	0.06	0.16	0.48
LOI	-5.1	2.0	1.6	3.8
Total		99.96	99.93	99.56
ppm				
As	0.5	<0.5	2.1	2.2
Ba	1	114	215	185
Be	1	<1	4	3
Bi	0.1	<0.1	<0.1	0.4
Cd	0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Co	0.2	0.5	2.1	41.3
Cs	0.1	0.6	1.9	3.9
Cu	0.1	<0.1	0.8	35.2
Ga	0.5	15.0	17.4	19.1
Hf	0.1	2.5	5.0	3.5
Hg	0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Mo	0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Nb	0.1	5.9	13.4	26.0
Ni	0.1	0.6	2.9	115.5
Pb	0.1	0.5	2.7	11.2
Rb	0.1	9.3	71.4	99.2
Sb	0.1	<0.1	0.4	0.2
Sc	1	3	6	17
Se	0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Sn	1	5	9	19
Sr	0.5	11.7	55.9	47.5
Ta	0.1	1.6	1.4	3.3
Th	0.2	9.0	15.1	2.3
Tl	0.1	<0.1	<0.1	<0.1
U	0.1	1.1	1.5	4.4
V	8	<8	22	129
W	0.5	1.3	3.7	3.9
Y	0.1	16.2	27.4	28.3
Zn	1	2	15	204
Zr	0.1	82.6	198.4	148.4
La	0.1	61.2	41.6	18.6
Ce	0.1	133.7	89.6	39.3
Pr	0.02	15.71	10.42	4.95
Nd	0.3	55.0	38.7	21.0
Sm	0.05	10.09	7.93	4.63
Eu	0.02	1.55	0.89	1.42
Gd	0.05	5.63	6.34	4.78
Tb	0.01	0.61	0.91	0.81
Dy	0.05	3.08	5.19	4.99
Ho	0.02	0.54	0.88	0.98
Er	0.03	1.72	2.72	2.73
Tm	0.01	0.26	0.38	0.40
Yb	0.05	1.79	2.41	2.39
Lu	0.01	0.28	0.37	0.38
Σ REE		291.16	208.34	107.36

contains pinkish colour porous to massive fine-grained glassy rhyolite. Microscopically, it has a well preserved porphyritic texture of quartz, feldspars and biotite in fine grained partly recrystallized groundmass (Fig. 2a, b).

Meta-rhyolite pyroclastic rock (sample PI-R11b) represents medium to coarse-grained marginal part of the fine-grained to glassy rhyolite (sample PI-R11a) from the same locality. Macroscopically, the mm to cm scale mineral and rock (rhyolite) fragments are distinguishable. Microscopically, it has well preserved clastic texture of quartz, feldspars and biotite, including rhyolite rock fragments, emplaced in fine grained partly recrystallized matrix (Fig. 2c, d).

Meta-rhyodacite north of Inovec Hill (sample PI-RD1) occurs as a few metre wide dyke crosscutting the Inovec Nappe basement micaschist-gneiss, the latter forming mm- to cm-size microxenoliths in the dyke. This fine-grained rock has a typical dark-green colour with macroscopically visible rare quartz grains. Microscopically, the rock has well preserved porphyritic texture of feldspars and biotite, less quartz, present in the fine-grained aggregate of lath-shape sodic plagioclase, partly to totally replaced by newly formed fine-grained white mica. In comparison with the meta-rhyolite from Hôrčanská Valley, they are richer in plagioclase that dominate in the groundmass (Fig. 2e, f). Kalifeldspar occurs only as phenocrysts.

The studied subalkaline silica-oversaturated acid volcanic rocks are projected in the rhyolite (samples PI-R11a, b) or andesite fields (sample PI-RD1) in TAS diagram (Le Bas et al., 1986; Fig. 3a), or in rhyolite (samples PI-R11a, b) and rhyodacite (sample PI-RD1) fields in the diagram of De La Roche et al. (1980; Fig. 3b).

The chondrite normalized REE patterns (normalization after Sun and McDonough, 1989) show slightly increased LREE content. Rhyolite samples display a weak negative Eu anomaly, while rhyodacite has no Eu anomaly (Fig. 3c). In multielement (spider) diagram (Fig. 3d) positive anomalies of Ba, Th, U, Pr, Nd and Sm are detectable, in comparison with depleted contents of Cs, Pb, Nb, As, Sr and Sc, exhibiting negative anomalies.

The rhyolite samples were projected to volcanic arc area, while the rhyodacite sample lies at the boundary between the volcanic arc and within plate areas in diagrams of Pearce et al. (1984; Fig. 4a-d) for granitoid rocks.

The dated oscillatory zoned zircon from rhyolite sample PI-R11a yielded an age of 262.4 ± 2.1 Ma (Fig. 5a, b). The dated oscillatory zoned zircon from pyroclastic rhyolite sample PI-R11b provided an age of 266.5 ± 1.9 Ma (Fig. 5c, d). The dated oscillatory zoned zircon from rhyodacite dyke exhibits an age of 262.1 ± 1.9 Ma (Fig. 5e, f). The usual grain size of dated zircon was from 100 to 300 μm .

Discussion

Rhyolite rock samples (including rhyolite pyroclastics) were confirmed in both chemical classification diagrams

(Fig. 3a and 3b). A problem has arisen with the third rhyodacite-type sample in the TAS diagram (Fig. 3a). Despite the rare occurrence of the quartz phenocrysts (Fig. 2f), the relatively low content of SiO_2 (Tab. 1) shifted this quartz-bearing rock to andesite field. A slight decrease in SiO_2 can be ascribed to a metamorphic overprint and accompanying Si mobility. A loss of SiO_2 (of about 5 wt.%) might have caused the shift from the dacite (rhyodacite) to andesite field. In classification diagram of De La Roche et al. (1980; Fig. 3b) this rock already occurs in rhyodacite field that is more consistent with the mineral composition of the dyke. Because of this reason we call it “rhyodacite” in agreement with Putiš (1981).

Documented normalized trace element patterns (Fig. 3c, d) are compatible with the areas of supra-subduction volcanism with the melted sources of continental crust. The chemical composition from quartz diorite/tonalite to granite may indicate different sources of volcanic rocks subjected to a different degree of fractionation. Rhyodacite however shows no fractionation, approaching primary quartz diorite/tonalite melt composition projected in within plate acid magmatism field (Fig. 4a, b) or on the boundary between volcanic arc and within plate acid magmatism (Fig. 4c, d). Rhyolites yield a weak negative Eu anomaly (around 0.2) consistent with a slightly fractionated granite source. The anchi-metamorphic conditions (Putiš, 1986; Putiš et al., 2008), achieved in the Inovec Nappe, were not sufficient for a more distinct mobility of the trace (including REE) elements and the rocks preserve well an original magma character, or the melt sources. The obtained zircon ages therefore represent the time of magmatic emplacement and magmatic crystallization of rhyolite and rhyodacite.

The ages of studied IFTA samples are consistent with the zircon age data of Permian volcanic rocks from northern Veporicum (Kotov et al., 1996; Vozárová et al., 2016), Gemericum and Meliaticum (Vozárová et al., 2009, 2012) as well as from higher Mesozoic nappes (in preparation). They seem to be related to a global extension event or Pangea supercontinent breakdown (e.g., Stampfli, 1996; Golonka, 2007) triggered by the NW-ward Paleotethys oceanic crust subduction. This event is often considered as a pre-orogenic phase of the new - Alpine orogenic cycle (e.g., Putiš et al., 2000). Comparison of the chemical composition of Permian volcanic rocks could indicate two different areas of Permian volcanism in the Central and Inner Western Carpathians. The area of northern Gemericum, Veporicum and Infrataticum exhibits predominated arc type acid volcanics depleted in Y, Yb, Nb and Ta. On the other hand in general small Eu anomaly values (usually less than 0.5) and low fractionation degree is not in a strong controversy with the riftogenic volcanics. The area of southern Gemericum and Meliaticum shows a more typical riftogenic acid volcanics characteristic for a within-plate paleotectonic environment (Vozárová et al., 2009, 2012), with an increased Y, Yb, Nb and Ta.

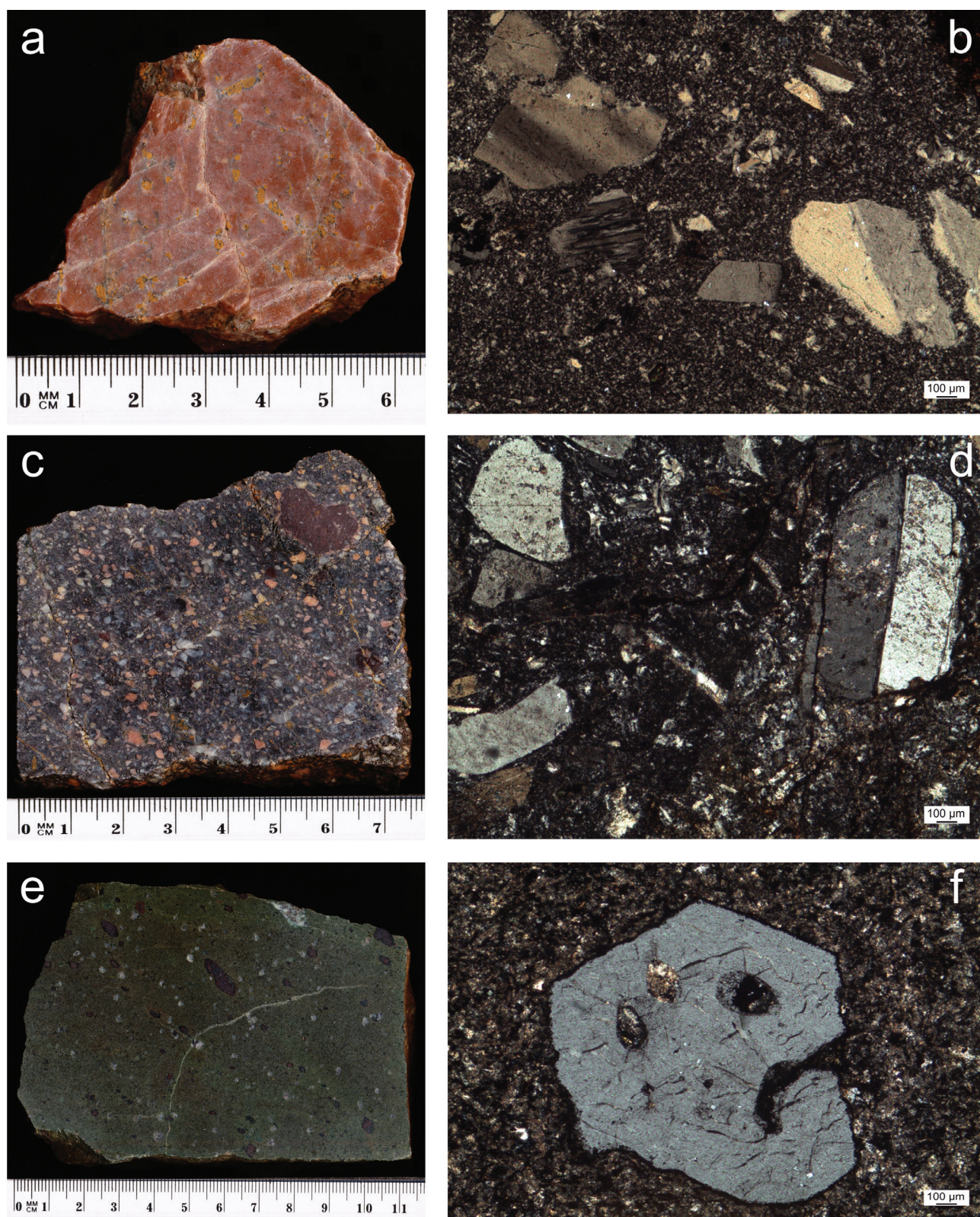


Fig. 2. Macro- and micro-images of dated rocks: a – b, PI-R11a, c – d PI-R11b, e – f PI-RD1.

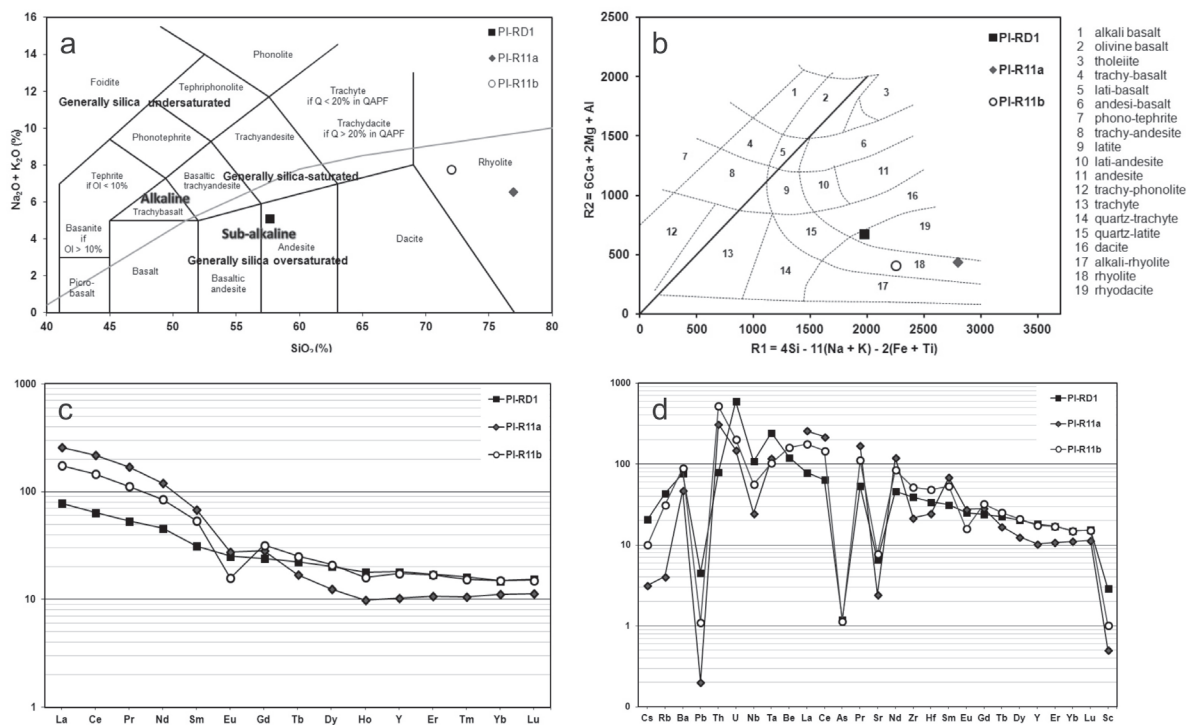


Fig. 3. Chemical composition and classification of dated rocks: a – TAS diagram for volcanic rocks after LeBas et al. (1986); b – Classification diagram after De La Roche et al. (1980); c – Chondrite normalized rare earth element patterns (normalization of REE and other trace elements according to C1 values after Sun and McDonough, 1989); d – Multielement (spider) diagram.

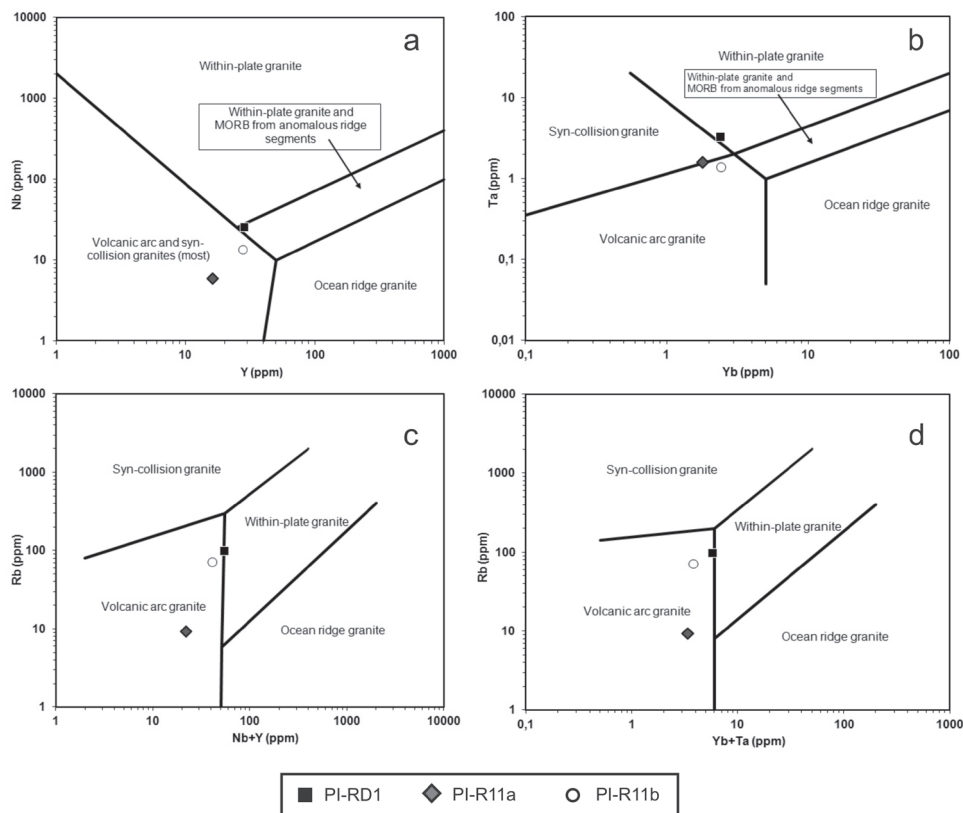


Fig. 4. Discrimination diagrams of granitoid rocks according to tectonic settings after Pearce et al. (1984).

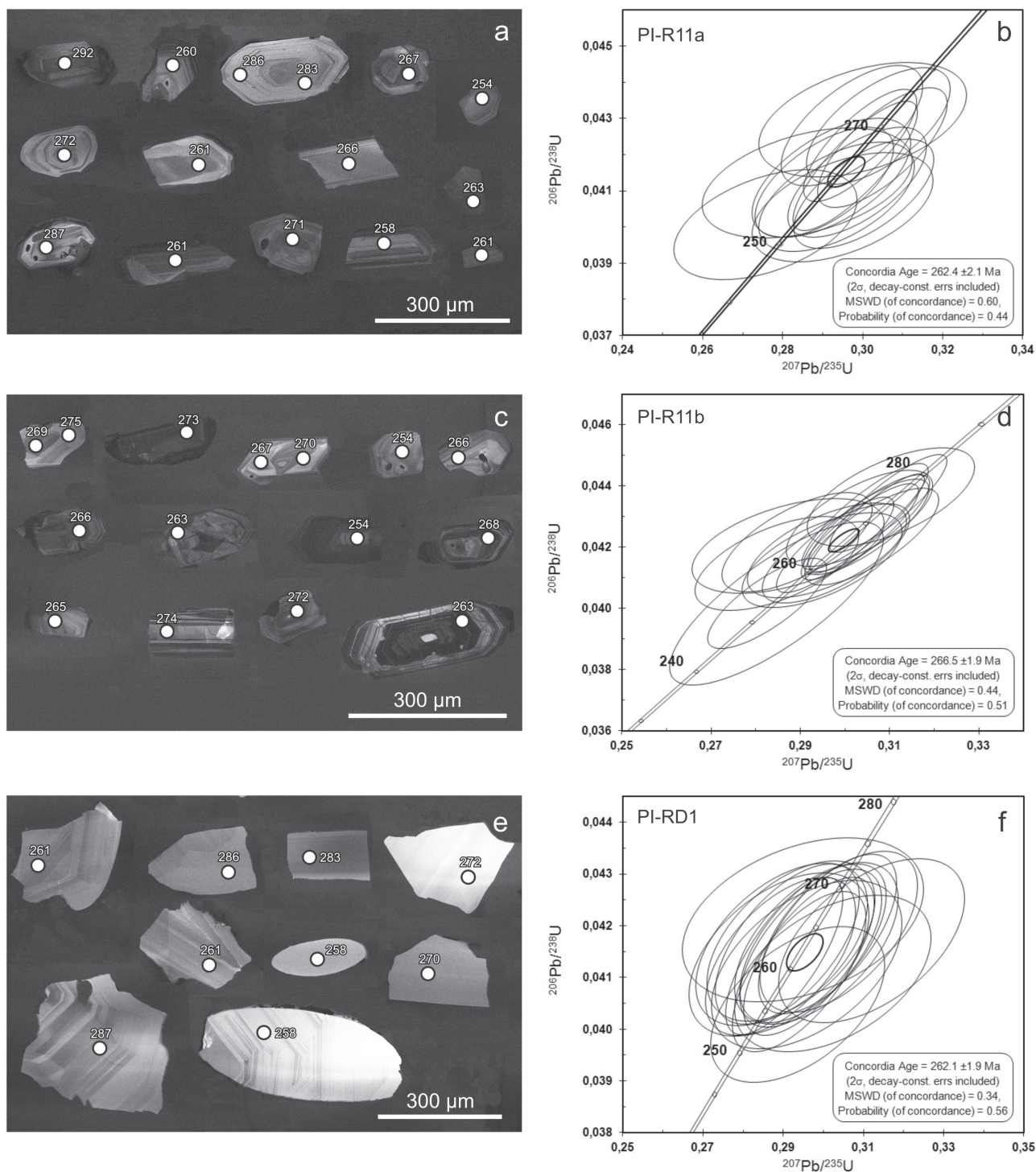


Fig. 5. Examples of CL images of dated $20 \times 30 \mu\text{m}$ spots in zircon (a, c, e). Conventional U/Pb concordia diagrams (b, d, f) with concordia ages.

Conclusions

The acid volcanic rocks in the Infratatic Inovec Nappe of the Central Western Carpathians reflect significant zone of partial melting of continental crust in Permian. Association of basalts to basaltoandesites with rhyolites and rhyodacites may correspond to calc-alkaline to subalkaline volcanic suite characteristic for active continental margins. The rhyodacite dykes may indicate a significance of continental rifting.

The U/Pb SIMS zircon dating of acid volcanic rocks revealed the narrow time span of Permian – Guadalupian (Wordian to Capitanian) volcanic activity from ca 267 to 262 Ma. These ages are comparable with those from other Permian complexes of the Western Carpathians, which underwent Permian volcanic arc-type activity and/or extension and accompanying rifting, most likely related to supercontinent Pangea breakdown.

Such kind of volcanic rocks, including the Permian siliciclastic host rocks, are missing in the neighbouring Tatic pre-Mesozoic basement, including the overlying north-Tatic Panská Javorina Nappe in the Považský Inovec Mountains.

Acknowledgement

The APVV-0081-10, APVV-15-0050 and VEGA 1/0079/15 grants (M.P.) are acknowledged. Ing. D. Troppová from the Earth Science Institute of Slovak Academy of Sciences is greatly acknowledged for the careful zircon separation.

References

- DANIŠÍK, M., DUNKL, I., PUTIŠ, M., FRISCH, W. & KRÁČ, J., 2004: Tertiary burial and exhumation history of basement highs along the NW margin of the Pannonian Basin – an apatite fission track study. *Austrian J. Earth Sci.*, 95 – 96, 60 – 70.
- DE LA ROCHE, H., LETERRIER, J., GRANDCLAUDE, P. & MARCHAL, M., 1980: A classification of volcanic and plutonic rocks using R_1 R_2 -diagrams and major element analysis – Its relationships with current nomenclature. *Chem. Geol.*, 29, 1 – 4, 18 – 210.
- GOLONKA, J., 2007: Phanerozoic paleoenvironment and paleolithofacies maps. Late Paleozoic. *Geologia*, 33, 2, 145 – 209.
- HOVORKA, D., 1960: Poznámky o kremitych porfyritych severnej časti Považského Inovca. *Geol. Práce, Zpr.*, 18, 10 – 15.
- IVANIČKA, J., HAVRILA, M. & KOHÚT, M. (eds.), KOVÁČIK, M., MADARÁS, J., OLŠAVSKÝ, M., HÓK, J., POLÁK, M., FILO, I., ELEČKO, M., FORDINÁL, K., MAGLAY, J., PRISTAŠ, J., BUČEK, S. & ŠIMON, L., 2007: Geological map of the Považský Inovec Mts. and SE part of the Trenčianska kotlina Depression 1 : 50 000. Bratislava, ŠGÚDŠ.
- KORIKOVSKY, S. P. & PUTIŠ, M., 1999: Evolution of authigenic and detrital K-micas at the boundary between anchimetamorphism and low-temperature metamorphism during the Cretaceous tectono-metamorphic cycle in the Western Carpathians. *Petrology*, 7, 4, 364 – 382.
- KOTOV, A. B., MIKO, O., PUTIŠ, M., KORIKOVSKY, S. P., SALNIKOVA, E. B., KOVACH, V. P., YAKOVLEVA, S., BEREZNAYA, N. G., KRÁČ, J. & KRIST, E., 1996: U/Pb dating of zircons of postorogenic acid metavolcanics and metasubvolcanics: a record of Permian-Triassic taphrogeny of the West-Carpathian basement. *Geol. Carpath.*, 47, 73 – 79.
- KRIST, E., KORIKOVSKY, S. P., PUTIŠ, M., JANÁK, M. & FARYAD, S. W., 1992: Geology and Petrology of Metamorphic Rocks of the Western Carpathian Crystalline Complexes. Bratislava, Comenius University Press, 324 p.
- KULLMANOVÁ, A. & GAŠPARIKOVÁ, V., 1982: Upper Cretaceous sediments in northern part of the Považský Inovec Mts. *Geol. Práce, Spr.*, 78, 85 – 95 (in Slovak, English summary).
- LEBAS, M. J., LEMAITRE, R. W., STRECKEISEN, A. & ZANETTIN, B., 1986: A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *J. Petrol.*, 27, 3, 745 – 750.
- LEŠKO, B., ŠUTORA, A. & PUTIŠ, M., 1988: Geology of the Považský Inovec Mts. horst based on geophysical investigation. *Geol. Zbor. Geol. carpath.*, 39, 2, 195 – 216.
- LI, X. H., LIU, Y., LI, Q. L., GUO, C. H. & CHAMBERLAIN, K. R., 2009: Precise determination of Phanerozoic zircon Pb/Pb age by multi-collector SIMS without external standardization. *Geochem., Geophys., Geosys.*, 10, Q04010, doi:10.1029/2009GC002400.
- LI, X. H., TANG, G. Q., GONG, B., YANG, Y. H., HOU, K. J., HU, Z. C., LI, Q. L., LIU, Y. & LI, W. X., 2013: Qinghu zircon: A working reference for microbeam analysis of U-Pb age and Hf and O isotopes. *Chinese Sci. Bull.*, 58, 4 647 – 4 654.
- LUDWIG, K. R., 2001: Users manual for Isoplot/Ex rev. 2.49. *Berkeley Geochronol. Centre Spec. Publ.*, 1, 56 p.
- PEACOCK, S. M., 1987: Creation and preservation of subduction-related inverted metamorphic gradients. *J. Geophys. Res.*, 92, B12, 12 763 – 12 781.
- PEARCE, J. A., HARRIS, N. B. W. & TINDLE, A. G., 1984: Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrol.*, 25, 4, 956 – 983.
- PELECH, O., HÓK, J., HAVRILA, M. & PEŠKOVÁ, I., 2016: Structural position of the Upper Cretaceous sediments in the Považský Inovec Mts. (Western Carpathians). *Acta geol. Slov.*, 8, 1, 43 – 58.
- PLAŠIENKA, D., 2012: Jurassic syn-rift and Cretaceous syn-orogenic, coarse-grained deposits related to opening and closure of the Vahic (South Penninic) Ocean in the Western Carpathians – an overview. *Geol. Quart.*, 56, 601 – 628.
- PLAŠIENKA, D., MARSCHALKO, R., SOTÁK, J., UHER, P. & PETERČÁKOVÁ, M., 1994: Pôvod a štruktúrne postavenie vrchnokriedových sedimentov v severnej časti Považského Inovca. Prvá časť: Litostratigrafia a sedimentológia (English summary: Origin and structural position of Upper Cretaceous sediments in the northern part of the Považský Inovec Mts. Part 1: Lithostratigraphy and sedimentology). *Miner. slov.*, 26, 311 – 334.
- PLAŠIENKA, D., GREČULA, P., PUTIŠ, M., KOVÁČ, M. & HOVORKA, D., 1997: Evolution and structure of the Western Carpathians: an overview, In: GREČULA, P., HOVORKA, D., PUTIŠ, M. (eds.): Geological Evolution of the Western Carpathians. Bratislava, *Miner. slov. – Monogr.*, 1 – 24.

- PLATT, J. P., 1993: Exhumation of high-pressure rocks: a review of concepts and processes. *Terra Nova*, 5, 119 – 133.
- POLÁK, S., 1956: Propylitizované dacitové efúzíva Inoveckého pohoria. *Geol. Práce, Zpr.*, 6, 45.
- PUTIŠ, M., 1981: Geologicko-tektonické pomery predtriasových útvarov Považského Inovca a kryštalinika Kráľovej hole. Kandidátska dizertačná práca. *Manuskript. Bratislava, archív GÚ SAV*.
- PUTIŠ, M., 1983: Outline of geological-structural development of the crystalline complex and envelope paleozoic of the Považský Inovec Mts. *Geol. Carpath.* 34, 4, 457 – 482.
- PUTIŠ, M., 1986: Príspevok k poznaniu mladšieho paleozoika Považského Inovca. *Geol. Práce, Spr.*, 84, 65 – 83.
- PUTIŠ, M., 1992: Variscan and Alpidic nappe structures of the Western Carpathian crystalline basement. *Geol. Carpath.*, 43, 6, 369 – 380.
- PUTIŠ, M., KOTOV, A. B., UHER, P., KORIKOVSKY, S. P. & SALNIKOVA, E. B., 2000: Triassic age of the Hrončok pre-orogenic A-type granite related to continental rifting: a new result of U-Pb isotope dating (Western Carpathians). *Geol. Carpath.*, 51, 59 – 66.
- PUTIŠ, M., SULÁK, M., GAWLICK, H.-J. & BOJAR, A.-V., 2006: Infratatrikum Považského Inovca (Západné Karpaty) – geodynamická evolúcia kontinentálneho svahu v susedstve oceánskeho penninika [Infrataticum of the Považský Inovec Mts. (Western Carpathians): Geodynamic evolution of continental margin in the vicinity of the oceanic Penninicum]. *Miner. slov.*, 38, 1, 7 – 28.
- PUTIŠ, M., GAWLICK, H. J., FRISCH, W. & SULÁK, M., 2008: Cretaceous transformation from passive to active continental margin in the Western Carpathians as indicated by the sedimentary record in the Infratatic unit. *Int. J. Earth Sci. (Geol. Resch.)*, 97, 4, 799 – 819.
- PUTIŠ, M., FRANK, W., PLAŠIENKA, D., SIMAN, P., SULÁK, M. & BIRON, A., 2009: Progradation of the Alpidic Central Western Carpathians orogenic wedge related to two subductions: constrained by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of white micas. *Geodinam. Acta* 22, 1 – 3, *Spec. Iss.*, 31 – 56.
- 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 – 2, 1 – 35.
- STACEY, J. S. & KRAMERS, J. D., 1975: Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 26, 207 – 221.
- STAMPFLI, G. M., 1996: The Intra-Alpine terrain: A Paleotethyan remnant in the Alpine Variscides. *Eclogae geol. Helv.*, 89, 13 – 42.
- SULÁK, M., KAINDL, R., PUTIŠ, M., SITEK, J., KRENN, K. & TÓTH, I., 2009: Chemical and spectroscopic characteristics of potassium white micas related to polystage evolution of the Central Western Carpathians orogenic wedge. *Lithos*, 113, 3 – 4, 709 – 730.
- SUN, S. S. & McDONOUGH, W. F., 1989: Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders, A. D., Norry, M. J. (eds.): *Magmatism in the Ocean Basins*. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.*, 42, 313 – 345.
- TOLLMANN, A., 1980: Geology and tectonics of the Eastern Alps (Middle Sector). *Abh. Geol. Bundesanst.*, 34, 197 – 255.
- VOZÁROVÁ, A., RODIONOV, A., VOZÁR, J., LEPEKHINA, E. & ŠARIKOVÁ, K., 2016: U-Pb zircon ages from Permian volcanic rocks and tonalite of the Northern Veporicum (Western Carpathians). *J. Geosci.*, 61, 221 – 237.
- VOZÁROVÁ, A., ŠMELKO, M. & PADERIN, I., 2009: Permian single crystal U-Pb zircon age of the Rožňava Formation volcanites (Southern Gemeric Unit, Western Carpathians, Slovakia). *Geol. Carpath.*, 60, 6, 439 – 448.
- VOZÁROVÁ, A., ŠMELKO, M., PADERIN, I. & LARIONOV, A., 2012: Permian volcanics in the Northern Gemericum and Bôrka Nappe system: U-Pb zircon dating and the implications for geodynamic evolution (Western Carpathians, Slovakia). *Geol. Carpath.*, 63, 3, 191 – 200.
- WIEDENBECK, M., ALLE, P., CORFU, F., GRIFFIN, W. L., MEIER, M., OBERLI, F., VONQUADT, A., RODDICK, J. C. & SPEIGEL, W., 1995: Three natural zircon standards for U–Th–Pb, Lu–Hf, trace-element and REE analyses. *Geostand. Newslett.* 19, 1 – 23.

U/Pb SIMS datovanie zirkónu ryolitovej interkalácie v permských sedimentoch a dajky ryodacitu v svoroch (infratatrikum, Z. Karpaty)

Článok sa zaoberá datovaním zirkónu kyslých vulkanitov typu ryolitov a dajky ryodacitu. Ryolity a ich pyroklastiká sa vyskytujú priamo v klastogénnych sedimentoch permu na svorových rulách inoveckého príkrovu infratatrika Považského Inovca v širšej oblasti Hôrčanskej doliny, resp. ako zavrásnené vo svorovo-rulovom kryštaliniku. Datovala sa aj dajka ryodacitu, umiestnená priamo vo svorových rulách severne od chaty pod Inovcom. Celohorninové chemické analýzy umožnili zostaviť grafy normalizované na chondrit (normalizácia s použitím hodnôt C1 podľa Sun a McDonough, 1989), ktoré ukazujú zvýšený obsah ľahkých prvkov vzácných zemin vrátane miernej Eu anomálie v prípade ryolitu. Tieto charakteris-

tiky, ako aj nízky obsah Y (Yb, Nb, Ta) premietajú ryolit a ryodacit do poľa vulkanického oblúka podľa diagramov granitoidov (Pearce et al., 1984). Ryodacit naznačuje skôr vnútroplatňový typ vulkanizmu. Datanie potvrdilo úzky časový interval kyslého vulkanizmu, od 267 do 262 mil. r. Tento typ vulkanizmu je charakteristický pre vulkanizmus ostrovo-oblúkového typu a následnú riftogenézu vnútri superkontinentu Pangea.

Doručené / Received: 25. 11. 2016

Prijaté na publikovanie / Accepted: 15. 12. 2016

Modelovanie sorpčných vlastností pôd Slovenska pre potreby geologického informačného systému

ROMAN HANGÁČ¹, PAVEL DLAPA², BORIS ANTAL¹, IVAN ZVARA³,
DUŠAN KOČICKÝ³ a MARIAN ZLOCHA⁴

¹ Ministerstvo životného prostredia SR, Sekcia geológie a prírodných zdrojov,
Nám. L. Štúra 1, 812 35 Bratislava

² Univerzita Komenského v Bratislave, Prírodovedecká fakulta, Katedra pedológie,
Ilkovičova 6, 842 15 Bratislava

³ ESPRIT, spol. s r. o., Pletierska 2, 969 01 Banská Štiavnica

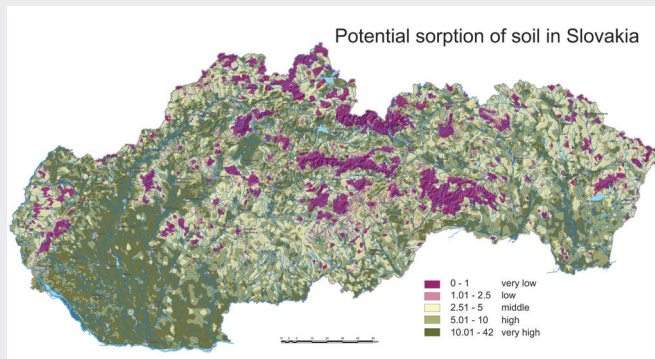
⁴ Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, Mlynská dolina 1, 817 04 Bratislava

Modelling of the sorption properties of soils in Slovakia for the purposes of geological information system

Abstract: The article describes an innovative imaging method that through a simple model allows evaluation of soil units with respect to ability to fulfill their environmental functions. Within solved project there was assessed a sorption potential of soil (PSP) for the whole territory of Slovakia through the PSP index. The PSP index was for modelling of soil properties calculated from the data available in the national databases of geochemical and soil survey, and are crucial to the schematic expression of sorption capacity rate of soils. The calculation includes information on active soil reaction (pH/H₂O), organic matter content (OH), content of clay fraction (OI) and the thickness of the A horizon (h_{AH}). Calculation was carried out through the score assigned to each range of values OH, OI and pH. The algorithm takes into account the score values through the different effect of pH on the function of organic matter and clay minerals. Score of these values is multiplied by the score of thickness and run according to following formula: $PSP ((OH \cdot PH_{OH}) + (OI \cdot PH_{OI})) \cdot h_{AH}$. Due to the limited scope, variability, or quality of archive data, we focused only on indicators that have been captured at all departmental databases and are crucial for sorption processes in soil. After the calculation of selected indicators, archived databases received a new added value. The resulting maps show sorption potential of soil prepared for the whole territory of Slovakia and are suitable for incorporation into existing geo-information systems.

Key words: potential soil sorption, environmental functions, modelling, contamination, calculation

Graphical abstract



Highlights

- The sorption potential of the soil for the whole territory of Slovakia was visualized in the map exportable for other GIS applications,
- The evolved model allows evaluation of individual soil parameters with regard to their environmental functions.

Úvod

V súčasnosti, keď na pôdu musíme nazeráť nielen ako na výrobný prostriedok, ale hlavne ako na zložku prírody, ktorá zabezpečuje ekologickú stabilitu prostredia, snažíme sa čoraz častejšie vyjadriť a ohodnotiť túto jej funkciu. Ekosystémové služby prostredia, a predovšetkým environmentálne funkcie pôdy, sa zväčša využívajú automaticky, bez ohľadu na to, či si to spoločnosť uvedomuje,

a ich hodnota sa môže prejavíť až vtedy, keď je ich zjavný nedostatok, nastane ich úbytok (Schulte et al., 2015) alebo sa ich využívanie premietne do ekonomických nákladov, resp. benefitov (Vilček, 2014). Kým voda a vzduch sú médiá so všeobecne definovaným zložením, pevné zložky životného prostredia ako pôda a sedimenty sú heterogénne systémy zložené z minerálnych a organických súčastí. Tieto systémy majú zvyčajne značnú pufrovaciu schopnosť, takže degradačné procesy či znečistenie môžu byť

dlhodobu tlmenú alebo skrytú. Za zmenených vonkajších podmienok sa však môžu tlmené procesy alebo obsiahnuté látky krátkodobu mobilizovať (Khun et al., 2008). Možnosť ohrozenia podzemnej či povrchovej vody je v tomto prípade zjavná, ale nemusí nevyhnutne predstavovať náhly havarijný stav. Poznatky o chemickom zložení riečnych sedimentov a regionálnej distribúcii prvkov majú z geochemického hľadiska najmä prospekčný význam. V prípade umelých vodných nádrží a jazier však splaveniny a usadeniny predstavujú negatívny prvok. Zanášanie, eutrofizácia či kontaminácia vodných nádrží určených na pitné účely, energetiku, závlahy či rekreáciu ako dôsledok erózie pôd v povodí predstavuje závažnú hrozbu (Hraško a Bedrna, 1988; Zaušková, 2003; Apitz et al., 2006). Tieto javy vo veľkej miere závisia od spôsobu hospodárenia na pôde v povodí a stavu jednotlivých krajinných prvkov, ktoré tvoria zložité pufrovacie systémy slúžiace ako prirodzená bariéra transportu pri erózii alebo pri šírení polutantov z nebudových zdrojov (Lowrance et al., 1995).

V rámci SR dodnes neexistuje konzistentný celoplošný systém, ktorý by prostredníctvom jednoduchých modelov umožňoval rýchle vyhodnotenie pôdných jednotiek alebo prvkov krajiny vzhľadom na schopnosť plniť ekosystémové služby. V snahe o kodifikáciu pôd z pohľadu ich neproduktívnych funkcií bol vo VÚPOP Bratislava už od roku 2003 postupne vypracúvaný systém prepočtov, ktoré vyjadrujú mieru plnenia ťažiskových environmentálnych funkcií poľnohospodárskych pôd Slovenska. Ide o schopnosť pôdy akumulovať vodu, filtrovať, imobilizovať alebo transformovať cudzorodé látky (Barančíková a Madaras, 2003; Barančíková a Makovníková, 2003; Makovníková et al., 2007; Makovníková a Barančíková, 2008; Vilček, 2014; Makovníková et al., 2013). Hodnotené environmentálne funkcie pôdy predstavujú najvýznamnejšie funkcie, ktoré je možné priamo zmerať, resp. modelovo odvodiť ich potenciál. Tieto práce sa však venujú iba poľnohospodárskym pôdam a pri potrebe zobrazenia alebo realizácie

opatrení na celonárodnej úrovni tak absentuje nemalá časť územia SR. Nové výsledky európskeho mapovania a hodnotenia ekosystémov a ich služieb (MAES, 2013; MAES, 2014) síce poskytujú prostredníctvom digitálneho atlasu hodnotenie mnohých environmentálnych funkcií v rámci krajín EÚ, hodnotené sú však jednotlivé typy ekosystémov samostatne, pričom pôdy nie sú inkorporované vo všetkých z nich a sledované boli väčšinou indikátory nevhodné na naše účely. Práve potreba modelového hodnotenia environmentálnych funkcií pôd celého územia SR z hľadiska schopnosti sorpcie znečisťujúcich látok nás priviedla k návrhu prepočtu (Antal et al., 2012), realizácii modelu a jeho mapového zobrazenia (Zvara et al., 2015), ktoré pracujú s dostupnými celoštátnymi databázami vzorkovania pôd.

Najdôležitejšie procesy väzby chemických prvkov na pôdu

Anorganické kontaminanty

Medzi najzávažnejšie cudzorodé látky v pôdach a sedimentoch patria potenciálne toxické prvky (PTP), ktorých sa do prostredia dostáva obrovské množstvo aj napriek ochranným opatreniam aplikovaným v priemysle a komunálnych zdrojoch znečistenia (tab. 1). Viaceré PTP pôsobia v ekosystéme toxicky aj pri nízkej koncentrácii (Makovníková et al., 2006; Khun et al., 2008). Toxicita PTP je rôzna a klesá v rade: $Hg > Cd > Ni > Pb > Cr$. Ich toxicita spočíva v substitúcii esenciálnych kovov v enzýmoch a iných životne dôležitých biomolekulách, čím dochádza k inhibícii ich funkcií (Makovníková et al., 2006). Za mimoriadne dôležitú treba považovať predovšetkým formu výskytu prvku, ktorá má z hľadiska nebezpečnosti zdroja obvykle dominantný vplyv. Medzi ďalšie faktory patria: druh prvku, jeho koncentrácia, spôsob expozície organizmu, možné synergické efekty atď. (Khun et al., 2008).

Tab. 1

Výskyt kontaminantov v 27 krajinách EÚ podľa dotazníka JRC (Huber a Prokop, 2012).
Occurrence of contaminants in 27 EU countries according to the questionnaire of the JRC.

Najčastejšie sa vyskytujúce kontaminanty (v %)			
v pôde		v podzemnej vode	
ťažké kovy (PTP)	35	ťažké kovy (PTP)	31
minerálne oleje	24	minerálne oleje	22
PAU	11	BTEX	15
BTEX	10	iné	14
iné	10	CIU	10
CIU	8	PAU	6
fenoly	1	fenoly	1
kyanidy	1	kyanidy	1

Chemické prvky sú v pôdach a sedimentoch fixované viacerými procesmi, najmä však sorpčnými procesmi a tvorbou sekundárnych minerálnych fáz. Keďže v prírodných systémoch je často ťažké rozhodnúť, či dochádza k adsorpcii alebo k zrážaniu, termín sorpcia sa často používa na označenie oboch procesov. Najdôležitejšie z týchto procesov sú procesy spojené s adsorpciou kovov z kvapalnej fázy na pevnú fázu a v prírodných podmienkach ju podmieňujú najmä hydrologické a geochemické pomery (Alloway, 1990; Apitz et al., 2006; Čurlík a Jurkovič, 2012).

Medzi zložky, ktoré sa v najväčšej miere podieľajú na sorpčných vlastnostiach pôdných koloidov, patria ílové minerály, karbonáty, Fe, Mn, Al, oxidy Ti a organická hmota (humínové látky) (Čurlík, 2011). Hiller (2003) a Littera et al. (2008) poukazujú na to, že koncentrácia chemických prvkov v roztokoch je významným spôsobom kontrolovaná spoluzrážaním a adsorpciou na oxyhydroxidoch Fe. V prípade, že povrchové pozície ešte nie sú nasýtené adsorbátom, prevláda tvorba povrchových komplexov. Povrchové zrážanie začne prebiehať vtedy, keď sa adsorpciou vyčerpajú povrchové pozície. Spätné uvoľňovanie prvkov viazaných v oxyhydroxidoch Fe a Mn závisí od stability týchto látok v rôznych podmienkach Eh a pH. Ako príklad možno uviesť $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s})$, keď pri poklese hodnôt pH sa uvoľňujú prvky z povrchu minerálu do roztoku (Bentley et al., 2006). Z toho vyplýva, že procesy adsorpcie a desorpcie prvkov viazaných na oxyhydroxidy Fe a Mn výrazne závisia od hodnoty pH.

Pokiaľ ide o ílové minerály, ich sorpčné vlastnosti vychádzajú z ich štruktúry, ktorá sa skladá z vrstvy tetraédrov SiO_4 a k nim viazaných hydroxidových vrstiev, v ktorých sú oktaedrické pozície najčastejšie obsadzované Mg^{2+} , Al^{3+} , Fe^{2+} a Fe^{3+} . Sorpcia potenciálne toxických prvkov na ílové minerály je významná predovšetkým pri vysokej koncentrácii týchto prvkov v roztokoch, pretože väčšina výmenných miest je tu už obsadená kationom Ca^{2+} a ďalšími hlavnými kationmi. Najväčšiu sorpčnú kapacitu majú pôdy s obsahom ílových minerálov smektitovej skupiny, najmenšiu kapacitu majú pôdy s kaolinitom (sorpčná kapacita klesá v rade: smektit $\approx$ vermikulit $>$ illit, chlorit $>$ halloyzit $>$ kaolinit) (Čurlík, 2011).

Humínové kyseliny môžu imobilizovať rozpustné výmenné formy niektorých potenciálne toxických prvkov za vzniku organokovových komplexov chelátového typu. Podľa Allowaya (1990) môžu humínové kyseliny s vhodnými reakčnými skupinami ako hydroxylová, fenoxyllová či karboxylová vytvárať koordinačné komplexy s kationmi kovov. Koeficienty stability majú tendenciu narastať v smere: $\text{Cu} > \text{Fe} \approx \text{Al} > \text{Mn} \approx \text{Co} > \text{Zn}$. Na väzbu kovov na humínové kyseliny a fulvokyseliny majú najväčší vplyv karboxylové skupiny a stabilita týchto komplexov narastá so zvyšujúcou sa hodnotou pH.

Schopnosťou viazať a koncentrovať chemické prvky z prostredia však disponuje aj biomasa samotná. Túto jej schopnosť, či už ide o živú, mŕtvu, inaktivovanú alebo modifikovanú biomasu, nazývame biosorpcia. Mechanizmus zodpovedný za túto akumuláciu je komplexný a zahŕňa také procesy ako fyzikálna a chemická adsorpcia, absorpcia, precipitácia či iónová výmena do rôznych kompartmentov mikrobiálnej bunky alebo na ne (Volesky a Holan, 1995; Vrana et al., 1998) či na korene rastlín (Jackson, 1998). Potenciálne využitie sorpčných vlastností mikroskopických vláknitých húb či vodných rias otvára možnosti aj v oblasti sanácie kontaminovaných pôd a vôd biosorbentmi (Čerňanský et al., 2007; Melčáková, 2008; Pet'ková et al., 2014; Žemberyová et al., 2014).

Organické kontaminanty

Pokiaľ ide o organické zlúčeniny, vzhľadom na svoju malú rozpustnosť vo vode vytvárajú silné hydrofóbne alebo sorpčné väzby s organickou hmotou, čo spôsobuje ich akumuláciu v pôdach a sedimentoch (Vrana et al., 1998; Dercová et al., 2009; Hiller et al., 2011). Z environmentálneho hľadiska sú dôležité najmä PAU a halogénované uhľovodíky, ktorých hlavný problém tkvie v ich rezistentnosti vo vzťahu k fotolytickej, chemickej a biologickej degradácii v živom prostredí, v schopnosti akumulovať a koncentrovať sa v lipidových štruktúrach živých organizmov, vyvolávať nežiaduce účinky na ľudské zdravie a vzhľadom na schopnosť sorpcie dlhodobo sa akumulovať v okolí zdroja. Na základe niektorých podobných vlastností bola vytvorená skupina tzv. perzistentných organických polutantov (POPs) (Apitz et al., 2006; Khun et al., 2008). Napríklad pri uvoľňovaní PCB do pôdy dochádza k ich adsorpcii na častice pôdy, majú tendenciu sa v pôde koncentrovať, pričom nemajú tendenciu sa z pôdy, resp. sedimentu vylúhovať vodou za bežných podmienok. Pokiaľ ide o vyparovanie, z pôdy ľahšie prchajú nižšie substituované PCB. Pri uvoľňovaní PCB do vody dochádza následne k akumulácii v sedimentoch a suspendovaných časticiach. Hoci adsorpcia zabezpečuje ich imobilitu na relatívne dlhý čas (zvlášť v prípade vyššie chlórovaných PCB), je možné aj spätné uvoľňovanie do vody (Haluška et al., 1993; Hiller et al., 2011).

Pri opise biosorpčných javov v organickej hmote sa v minulosti väčšinou konštatovalo, že akumulácia vysoko hydrofóbnych organických látok priamo závisí od obsahu lipidov v biomase. K opačnému zisteniu však dospeli Shin et al. (1970) pri sledovaní adsorpcie DDT rôznymi pôdnymi frakciami. Absencia štruktúr podobných lipidom neznížila, ba naopak, zvýšila sorpciu DDT pôdou, čo naznačuje, že pri biosorpcii môžu hrať úlohu aj iné látky. Zaujímavé je aj zistenie, že biosorpčná kapacita rôznych vzoriek biomasy vláknitých húb priamoúmerne závisela od množstva celkového organického uhlíka (TOC). Tento jav však nie

je objasnený, dá sa len predpokladať, že biosorpčná kapacita sa zvyšuje s podielom deštruovaných mikrobiálnych buniek v médiu, ktorý koreluje s obsahom TOC uvoľneného do média (Tsezos a Seto, 1986).

Materiál a metódy

Metodika hodnotenia potenciálnej sorpcie pôdy

Potenciálna sorpcia pôdy vyjadruje v zjednodušenej forme fyzikálnu a fyzikálno-chemickú schopnosť pôdy viazať ióny a molekuly rôznych látok a tlmiť reakcie prebiehajúce medzi jednotlivými fázami. V rámci projektu *Geologický prieskum pravdepodobných environmentálnych záťaží metódami diaľkového prieskumu Zeme a modelovaním* (Zvara et al., 2015) bola potenciálna sorpcia pôdy vyhodnotená z celého územia SR prostredníctvom indexu PSP. Index PSP na modelovanie vlastností pôd bol vypočítaný z údajov, ktoré boli k dispozícii v databázach a ktoré sú na základe uvedených poznatkov kľúčové pri schematickom vyjadrení miery sorpčnej kapacity konkrétnej pôdy. Do výpočtu vstúpili údaje o aktívnej pôdnej reakcii pH/H₂O (pH), obsahu humusu (OH), obsahu ílovej frakcie (OI) a hrúbke horizontu A (h_{AH}). Priestorové

k jednotlivým rozsahom hodnôt OH, OI a pH. Pri metodike sme sa inšpirovali výpočtom Makovníkovej et al. (2007), ktorý po modifikácii pracuje s inými pôdnymi indikátormi. Kľúčom pri výbere indikátorov bola prítomnosť potrebných údajov v rezortných databázach, ich konzistencia a zásadný význam pre sorpčné procesy v pôde. Algoritmus tu prostredníctvom skóre hodnôt pH stanovených zvlášť pre OH a OI zohľadňuje aj fyzikálne a chemicky rozdielny vplyv hodnoty pH na funkciu humusu a ílových minerálov. Skóre týchto veličín je vo výpočte vynásobené hodnotou skóre hrúbky horizontu A podľa nasledujúcej rovnice:

$$PSP = [(OH \cdot pH_{OH}) + (OI \cdot pH_{OI})] \cdot h_{AH}.$$

Skóre jednotlivých indikátorov bolo stanovené na základe tabuľky 2.

Výsledné hodnoty indexu potenciálnej sorpcie boli zaradené do nasledujúcich tried:

- veľmi nízka 2,5;
- nízka 2,51 – 4,5;
- stredná 4,51 – 6,5;
- vysoká 6,51 – 8,5;
- veľmi vysoká 8,5.

Tab. 2.
Rozsah hodnôt a skóre sledovaných indikátorov.
Range of values and achieved scores for the monitored indicators.

Obsah humusu (%) (OH)		pH pre obsah humusu (pH _{OH})		Obsah ílu (%) (OI)		pH pre obsah ílu (pH _{OI})		Hrúbka horizontu A (h _{AH})	
rozsah	skóre	rozsah	skóre	rozsah	skóre	rozsah	skóre	rozsah	skóre
≥ 8,01	5	≥ 7,01	3	≥ 50,01	2,5	≥ 7,01	3		
6,01 – 8,0	4	6,01 – 7,0	2	40,01 – 50	2,0	6,01 – 7,0	2	≥ 21 cm	2
5,01 – 6,0	3	4,51 – 6,0	1	25,01 – 40	1,5	4,51 – 6,0	1	< 21 cm	1
4,01 – 5,0	2	≤ 4,5	0,5	10,01 – 25	1,0	≤ 4,5	0		
0,05 – 4,0	1			0,05 – 10	0,5				

vrstvy jednotlivých indikátorov boli získané z dostupných bodových údajov prieskumu pôd realizovaného v rámci úloh *Geochemický atlas SR*, časť *Pôdy* (Čurlík a Šefčík, 1999), *GEMAS* (Slaninka et al., 2011), súborov máp geofaktorov životného prostredia a iných. Po geoštatistickom a interpolačnom spracovaní tieto údaje pokrývajú celé územie SR v gride 100 x 100 m.

Výpočet bol realizovaný na základe návrhu metodiky Antala et al. (2012) prostredníctvom priradenia skóre

Metodika spracovania a interpretácie údajov

Analýza aj interpretácia výsledkov bola spracovaná v prostredí geografického informačného systému ArcMap s rozšíreniami na rastrové analýzy *Spatial analyst* a geoštatistické analýzy *Geostatistical analyst*. Kľúčovým bodom analýz bola extrapolácia bodových údajov prieskumu pôd do spojitých polí reprezentujúcich priestorovú distribúciu jednotlivých faktorov použitých na schematické vyjadre-

nie miery sorpčnej kapacity. Pri odvodzovaní spojitých polí obsahu humusu a obsahu ílu sme vychádzali z 24 736 sond (priemerne asi 5 sond na 10 km²) a pri odvodzovaní spojitého poľa aktívnej pôdnej reakcie (pH/H₂O) sme vychádzali z 9 961 sond (priemerne asi len 2 sondy na 10 km²). Tu si treba uvedomiť, že ide o priemerné hodnoty hustoty vzorkovacej siete a skutočné rozmiestnenie sond je priestorovo značne nehomogénne, s podstatne vyššou koncentráciou sond na poľnohospodársky využívaných pôdach v nížinách a kotlinách. Vzhľadom na značnú heterogenitu prírodného prostredia Slovenska a tým aj činiteľov determinujúcich priestorovú distribúciu jednotlivých faktorov vstupujúcich do výpočtu miery sorpčnej kapacity pôdy sa využitie štandardných interpolačných metód ukázalo ako nevhodné. To znamená, že vypočítané spojitú rastrové polia jednotlivých faktorov v dostatočnej miere neodzrkadľovali zákonitosti priestorovej distribúcie krajinskej sféry, ako napríklad diskontinuity na rozhraniach kontrastných prírodných prostredí, príčinné závislosti medzi distribúciou jednotlivých prvkov krajinného prostredia a podobne. Preto sme sa pokúsili o komplexnejší prístup k modelovaniu priestorovej distribúcie jednotlivých faktorov, pričom pri každom faktore sme volili modifikovaný prístup v závislosti od dostupných údajov, miery entropie a priestorovej autokorelácie faktora. Vychádzali sme z predpokladu, že procedúrou integrácie je možné spresňovať a detailizovať mapovanie priestorovej diferenciácie jednej tematickej vrstvy na základe referenčných vrstiev, ktorých informačná hustota a vierohodnosť je vyššia.

Ako zdroj údajov o diferenciácii prvkov geografického prostredia (vysvetľujúce faktory priestorového rozloženia

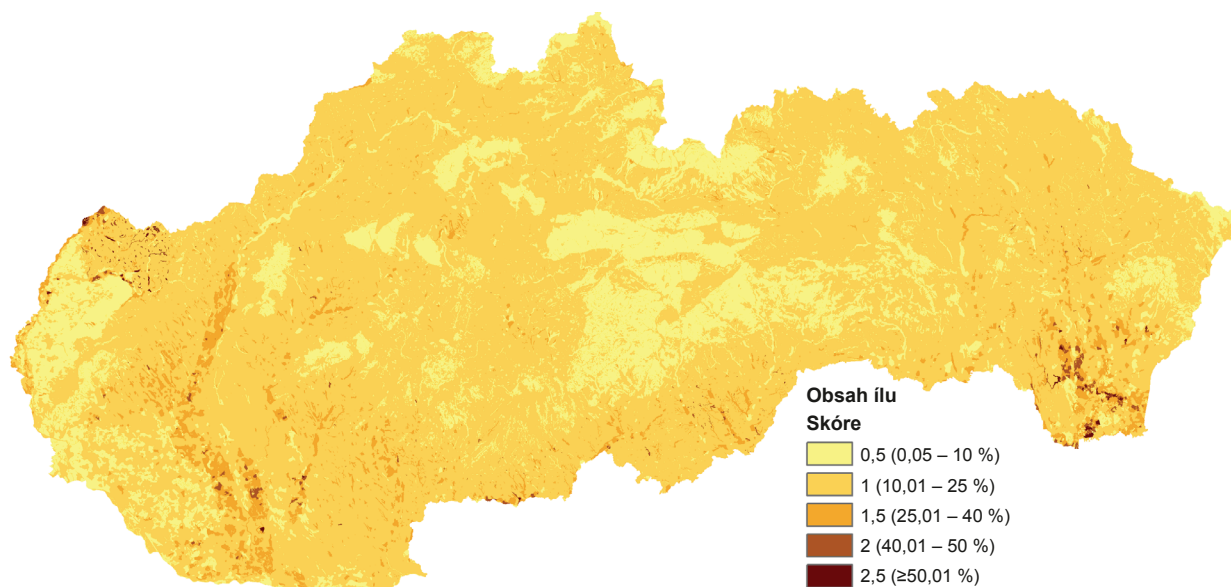
OI) bola použitá vektorová digitálna databáza abiokomplexov (Malík et al., 2012). Výhodou prístupu bolo, že hodnoty atribútov opisujúcich jednotlivé areály sú vertikálne konzistentné (logicky nerozporné) a pri následnom skúmaní korelačných väzieb sa vyskytnú podstatne menej chýb vo vstupnom súbore. Abiokomplexy vznikali dôsledným delením územia na čo najhomogénnejšie útvary krajinného priestoru a obsahujú údaje o všetkých zložkách krajiny, no najmä o geomorfológii, geológii, pôdach, kvarteri a klíme.

Obsah ílovej frakcie (OI)

Pri modelovaní OI (obr. 1) sme pristúpili k zjednodušeniu areálov abiokomplexov, prebehla teda geografická typizácia. Na zjednodušenie areálov sa vybrali nasledujúce charakteristiky:

- a) kód morfografickej charakteristiky formy reliéfu,
- b) kód polohy formy vzhľadom na transport materiálu,
- c) prevládajúci sklon formy – kategória,
- d) kód pôdneho subtypu,
- e) geologickosubstrátový komplex,
- f) kód klimatogeografického regiónu.

Výsledkom danej typizácie bol vznik nových areálov, ktorých hranice tvoria línie s predpokladanou skokovou zmenou obsahu pôdnych frakcií. Pre takto definované areály bola v ďalšom postupe zvolená interpolačná, resp. geoštatistická metóda, schopná najlepšie vystihnúť zákonitosti priestorovej distribúcie pôd v daných fyzicko-geo-



Obr. 1. Mapa skóre obsahu ílovej frakcie.

Fig. 1. Map of achieved score for content of clay fraction.

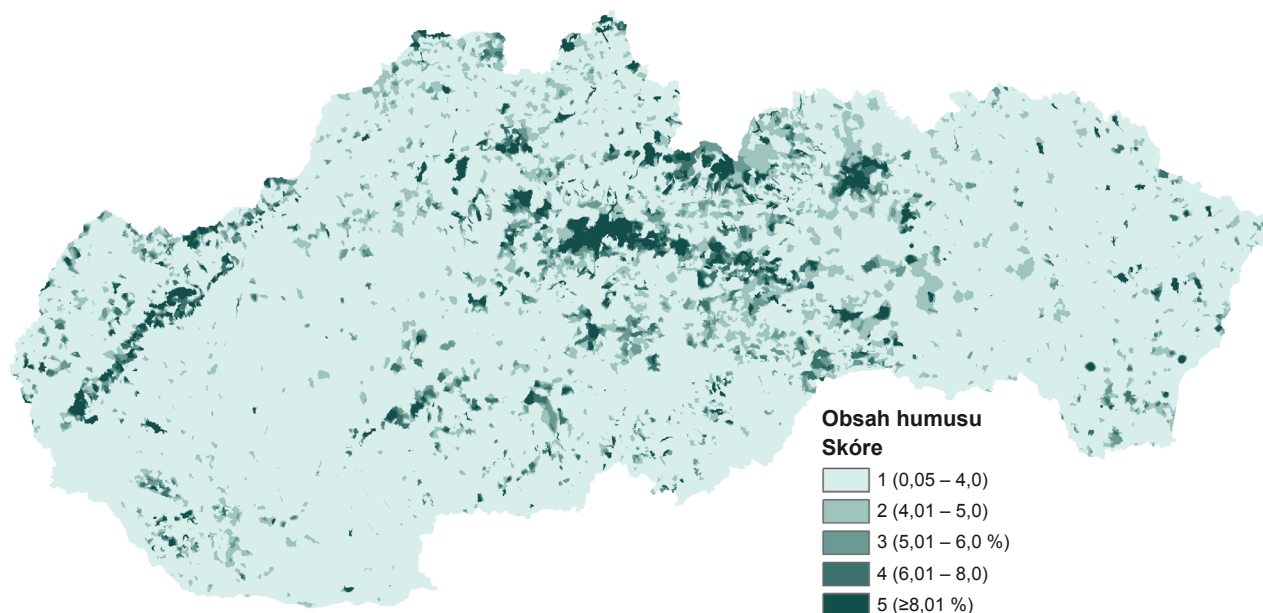
grafických podmienkach, pričom hranice takýchto areálov sa považovali za bariéry interpolácie.

Odvodenie gridu sme realizovali v závislosti od geografického charakteru územia a hustoty pôdných sond dvomi samostatnými metódami, aby boli v čo najvyššej možnej miere zachytené hlavné črty variability modelovaného javu. Interpoláčna metóda *spline* s bariérami bola použitá pri tých homogénnych areáloch (abiokomplexoch), v ktorých boli k dispozícii vzorky aspoň z dvoch pôdných sond. V takto definovaných územiach nie je vnútorná variabilita zložiek krajiny ovplyvňujúcich priestorovú distribúciu parametrov pôdy relevantná. Predpokladala sa teda spojitá zmena obsahu minerálnych frakcií v pôde, ktorú je možné dobre interpolovať zvolenou metódou. Bariéry boli definované na kontrastných hraniciach medzi abiokomplexmi, kde sa na základe analýz predpokladala skoková zmena pôdných parametrov, napríklad medzi aluviálnymi formami, resp. ostatnými koncovými morfograficko-polohovými formami reliéfu a transportnými formami. Pri homogénnych areáloch, v ktorých sa vyskytovala len jedna sonda, boli v nej merané hodnoty vzťahované na celý areál. Pri ostatných územiach s variabilitou zložiek krajiny ovplyvňujúcich priestorovú distribúciu zrnitostných frakcií pôdy vyššou, ako bola hustota pôdných sond, bola použitá metóda viacnásobnej lineárnej analýzy. Pri nej boli na základe regresnej analýzy ako vysvetľujúce premenné

použité nasledujúce charakteristiky, najlepšie vysvetľujúce variabilitu skúmaného javu: geologickosubstrátový komplex, pôdny subtyp, sklon svahu, dĺžka svahu.

Obsah humusu (OH)

Pri modelovaní priestorovej distribúcie OH (obr. 2) sme zvolili podobný postup ako pri OI, ale s istým rozdielom. Pretože neboli pozorované štatisticky významné korelácie medzi OI a ďalšími skúmanými charakteristikami prírodného prostredia, nebolo účelné použitie viacnásobnej lineárnej regresie. Istá štatistická závislosť bola pozorovaná medzi pôdnym typom a OH, kde sa preukázali štatisticky významné rozdiely v priemernej hodnote OH pri jednotlivých kategóriách pôdných typov. Predpokladali sme teda, že ich hranice môžu tvoriť línie s predpokladanou skokovou zmenou OH. Na interpoláciu OH sme použili lokálnu polynomickeú funkciu so zahrnutím bariérového efektu, pričom použité bariéry nie sú absolútne, ale pomerne k miere priepustnosti (kontrastnosti) znižujú vplyv sond na územie za bariérou. Táto interpoláčna metóda umožňovala zahrnúť do distribúcie OH ako spresňujúci faktor mapu pôdných typov, pričom sme predpokladali, že OH v rámci areálu pôdneho typu sa mení spojitاً a k skokovým zmenám dochádza pozdĺž hraníc areálov. Intenzita bariérového efektu bola odhadnutá expertne na základe



Obr. 2. Mapa skóre obsahu humusu.

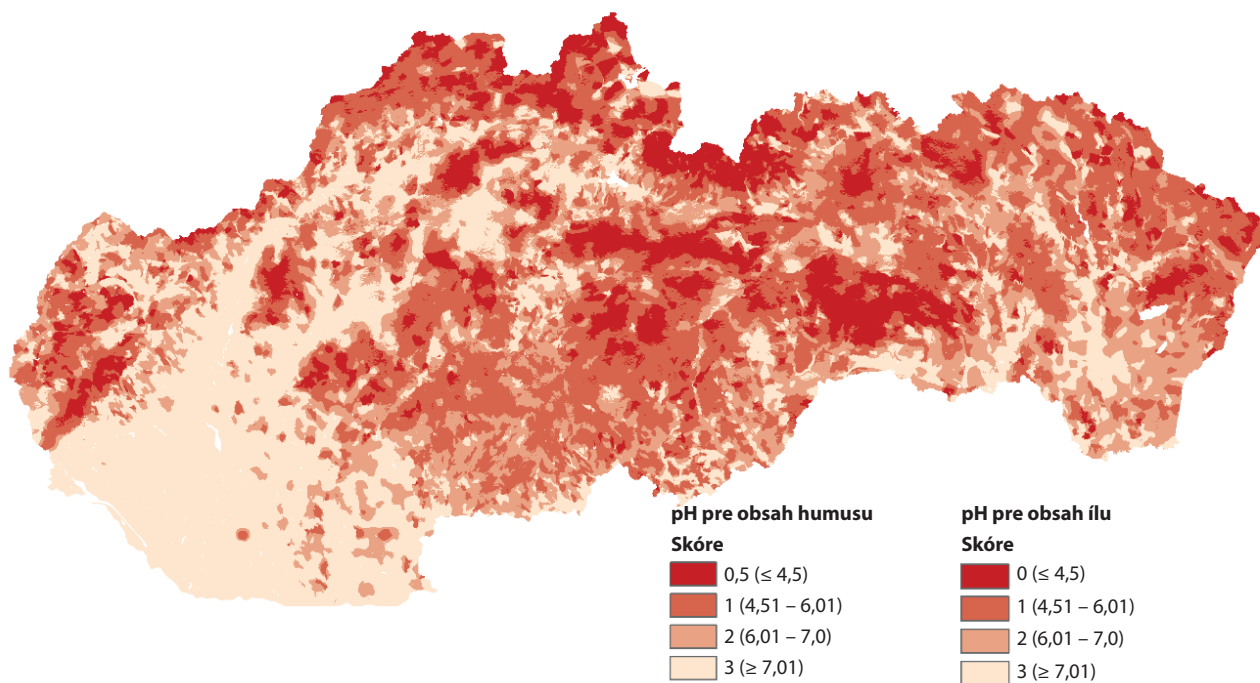
Fig. 2. Map of achieved score for content of soil organic matter.

kontrastnosti susediacich pôdnych typov, pričom sa bral do úvahy rozdiel v priemernej hodnote OH medzi jednotlivými pôdnymi typmi.

Aktívna pôdna reakcia (pH)

Pri tvorbe modelu priestorovej distribúcie hodnoty pH/H₂O sme vychádzali z predpokladu, že hodnota pH závisí od viacerých faktorov prírodného prostredia. Testovali sme hypotézu, že je možné odvodiť štatisticky významný regresný vzťah medzi pH a nadmorskou výškou, priemernou vlhkosťou pôdy reprezentovanou zrážkovým prebytkom, vegetačným pokryvom a geologickým podkladom. Najtesnejšia závislosť sa preukázala medzi hodnotou pH a zrážkovým prebytkom (koeficient determinácie 0,3) a následne nadmorskou výškou. Medzi týmito dvomi premennými sa však preukázala významná kolineácia. Na modelovanie priestorovej distribúcie sme teda použili regresnú rovnicu medzi zrážkovým prebytkom ako nezávislou premennou a pH ako závislou premennou. Následne

sme testovali odchýlky hodnôt modelovaných na základe regresnej rovnice a meraných hodnôt na jednotlivých sondách. Vypočítané reziduá sme ďalej interpolovali podobne ako pri OH lokálnou polynomicou funkciou so zahrnutím bariérového efektu, pričom použité bariéry nie sú absolútne, ale pomerne k miere priepustnosti (kontrastnosti) znižujú vplyv sond na územie za bariérou. Pretože sa istá štatistická závislosť potvrdila medzi geologickosubstrátovým komplexom (GSK) a hodnotou pH, kde sa preukázali štatisticky významné rozdiely v priemernej hodnote pH pri jednotlivých kategóriách GSK, predpokladali sme, že ich hranice môžu tvoriť línie s predpokladanou skokovou zmenou pH. Takto interpolované výsledné reziduá sme potom pripočítali ku gridu modelovanému na základe regresnej rovnice medzi zrážkovým prebytkom a hodnotou pH. Model prostredníctvom hodnôt skóre pH stanovených zvlášť pre OH a OI zohľadňuje fyzikálne a chemicky rozdielny vplyv hodnoty pH na funkciu humusu a ílových minerálov (obr. 3).

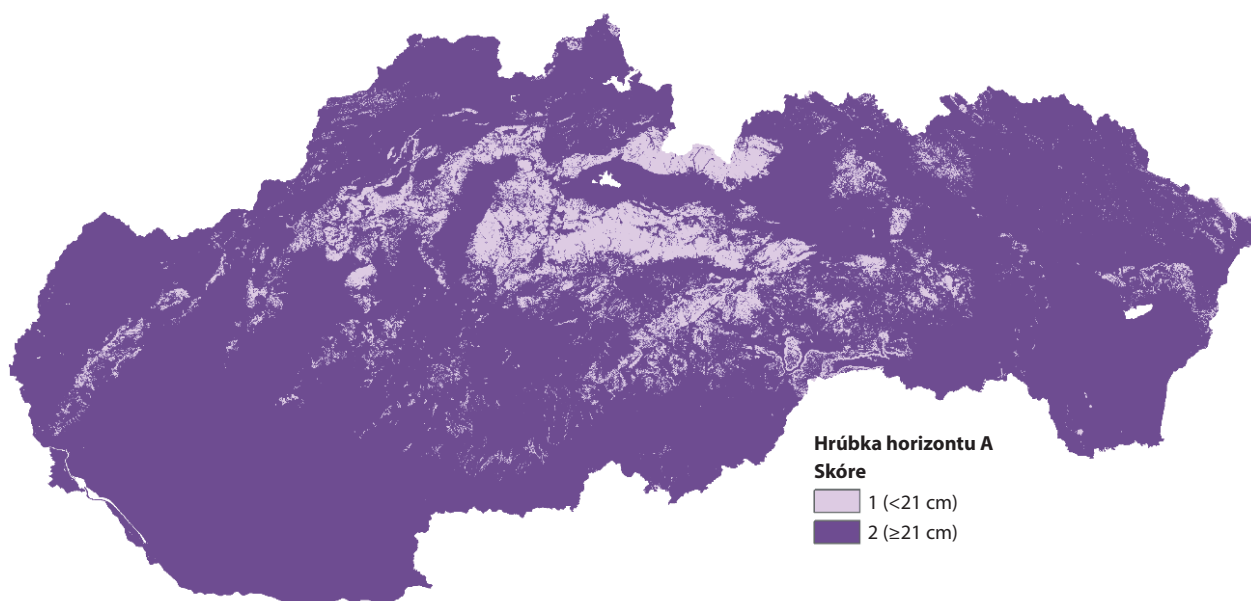


Obr. 3. Mapa skóre aktívnej pôdnej reakcie.
Fig. 3. Map of achieved score for active soil reaction.

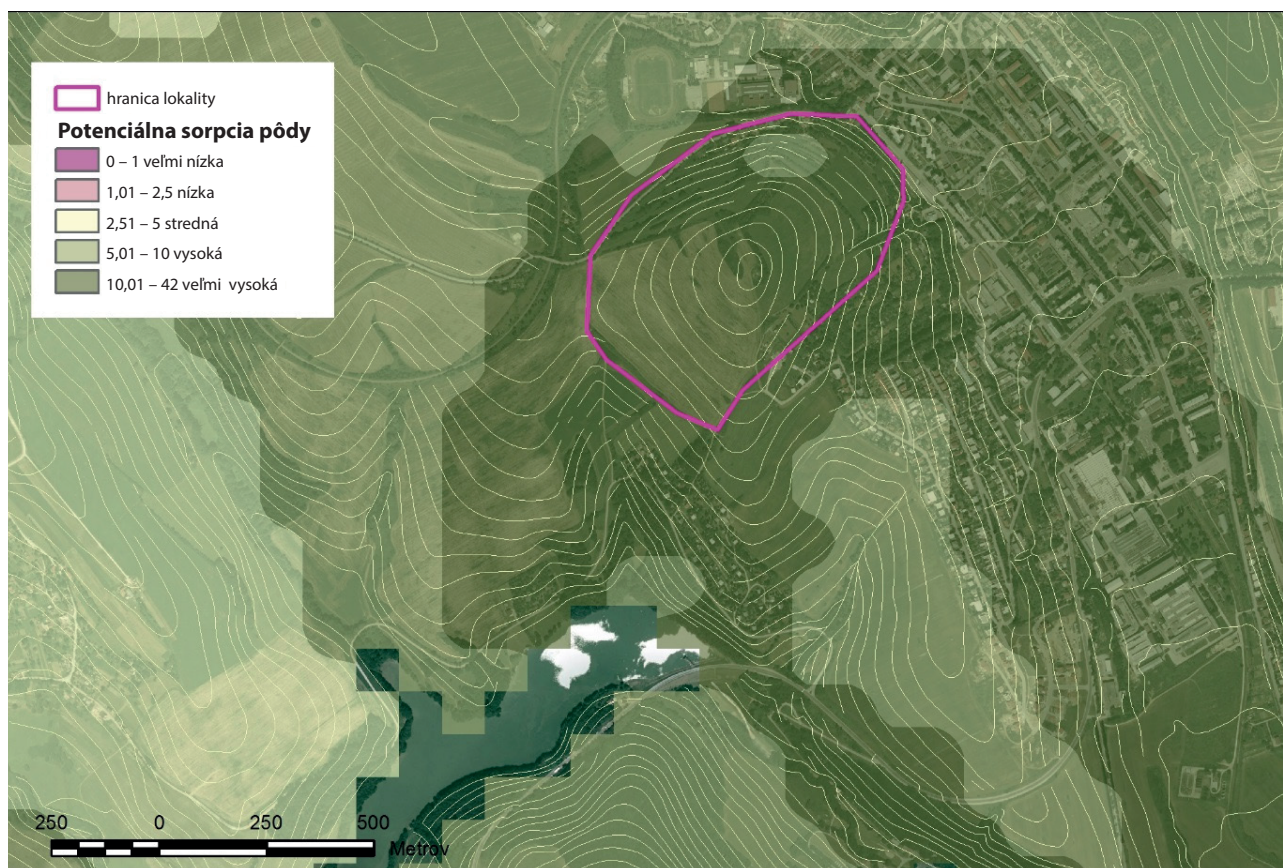
Hrúbka horizontu A (h_{AH})

Ako hlavné diferenciačné kritérium hĺbky pôdy uvádzajú viacerí autori pôdotvorný substrát (geologickosubstrátový komplex v abiokomplexoch) (Mičian, 1977; Šály, 1998) a sklon terénu. Táto závislosť sa potvrdila aj štatistickým zhodnotením závislosti h_{AH} od týchto premenných

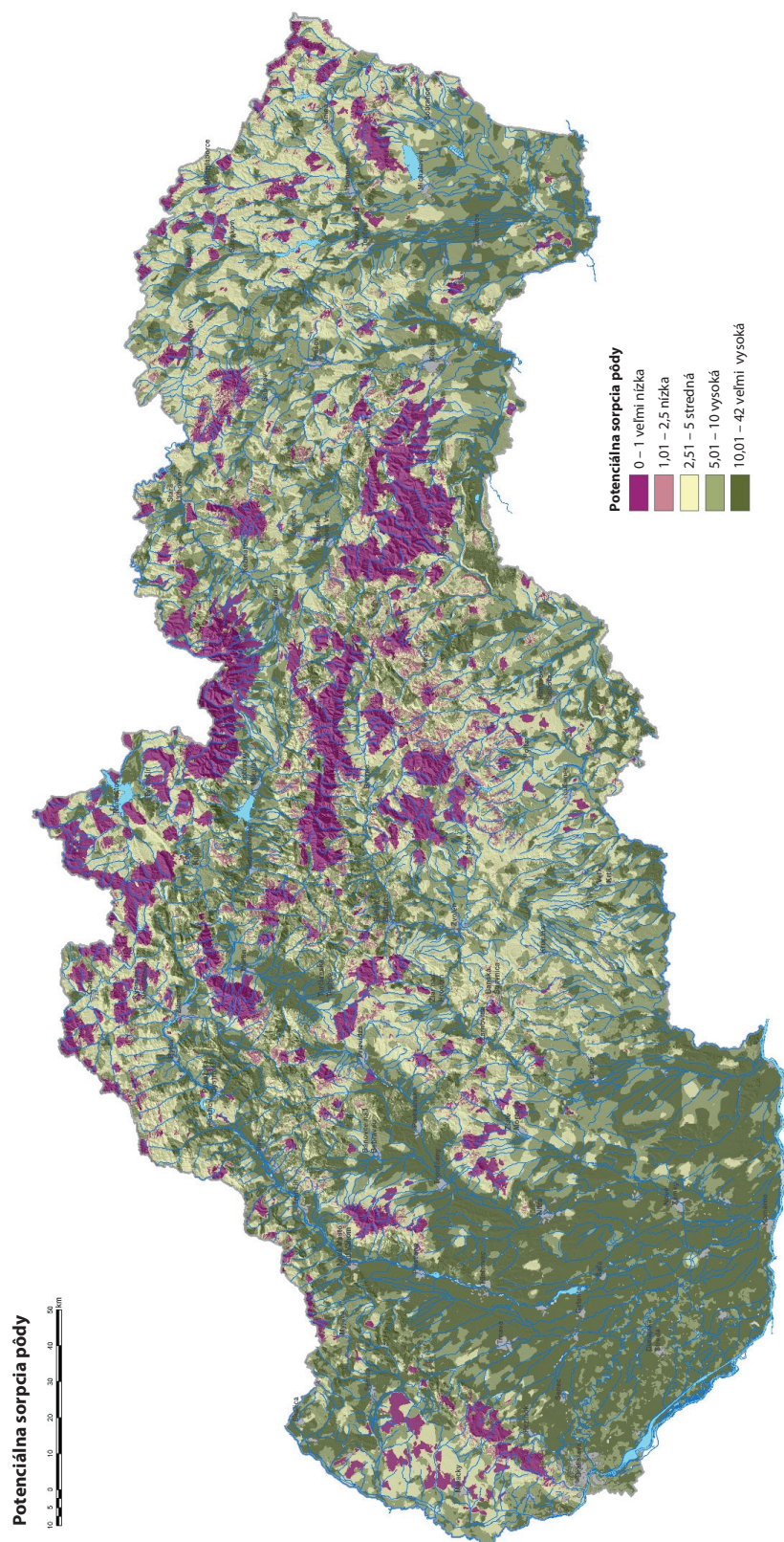
na výberovom súbore pôdnych sond. Na základe takto vytvorenej schémy sme k jednotlivým areálom, abiokomplexom, priradili kategóriu h_{AH} v závislosti od atribútu geologickosubstrátový komplex a kategória sklonu. Predpokladali sme, že priestorová diferenciácia obsahu skeletu v pôde je riadená ďalšími vlastnosťami reliéfu, z ktorých sme za diferenciačné považovali morfolograficko-polohový



Obr. 4. Mapa skóre hrúbky horizontu A.
Fig.4. Map of achieved score for thickness of A horizon.



Obr. 5. Príklad výsledného zobrazenia potenciálnej sorpcie pôdy na vybranej lokalite Stará Turá, skládka komunálneho odpadu Drahý vrch.
Fig. 5. Example of resulting display of potential soil sorption at selected site Stará Turá - Drahý vrch communal waste dump.



Obr. 6. Výsledné mapové zobrazenie potenciálnej sorpcie pôdy spracované z celého územia SR.

Fig. 6. Resulting map display of potential soil sorption prepared for whole territory of the Slovak Republic.

typ a geometrickú formu. Na základe týchto faktorov sme modifikovali hodnoty h_{AH} pre každý typ abiokomplexu a vytvorili sme gridovú vrstvu h_{AH} (obr. 4).

Výsledky a diskusia

Pomocou opísanej metodiky sme získali hodnoty gridov jednotlivých indikátorov, ktoré sme následne klasifikovali do intervalov na základe tab. 2 a k jednotlivým intervalom sme priradili skóre. Výsledný grid indexu potenciálnej sorpcie pôdy bol vypočítaný metódou mapovej algebry na základe uvedenej rovnice a klasifikovaný do príslušných tried indexu potenciálnej sorpcie pôdy. Príklad výsledného zobrazenia potenciálnej sorpcie pôdy na vybranej lokalite s environmentálnou záťažou vytvoreného s využitím opísaného modelu je uvedený na obr. 5. Pri interpretácii platí nepriamy vzťah medzi hodnotou potenciálnej sorpcie a rizikom spojeným s kontamináciou pôdy. Nižšia hodnota potenciálnej sorpcie predstavuje vyššie riziko mobility a toxického pôsobenia PTP vstupujúcich do pôdy. Výsledné mapové zobrazenie potenciálnej sorpcie pôdy spracované z celého územia SR je vhodné na prípadné zakomponovanie do súčasných geoinformačných systémov (GeoIS, IMK, Pôdny portál atď.) a je uvedené na obr. 6.

Aj napriek tomu, že výsledky rešpektujú základné fyzikálno-chemické procesy v pôdach, sme si vedomí, že model podlieha značnému zjednodušeniu a existuje celý rad iných funkcií pôdy, ktoré sme do analýz nezahrnuli. Vzhľadom na obmedzený rozsah, variabilitu alebo kvalitu archívnych údajov sme sa sústredili iba na indikátory, ktoré boli vo všetkých využitých databázach a sú kľúčové pre sorpčné procesy v pôde. Po uvedených prepočtoch vybraných indikátorov tak rezortné archívne databázy geochemického prieskumu pôd dostali novú pridanú hodnotu a stále poskytujú možnosti na účelové hodnotenie ďalších funkcií. Komplexnému hodnoteniu ekosystémových služieb v prospech spoločnosti sa v súčasnosti venuje veľká pozornosť hlavne v európskom meradle (DEFRA, 2007; EEA, 2011). Výsledkom takýchto experimentálnych metódik bol napr. projekt celoeurópskeho mapovania a hodnotenia ekosystémov a ich služieb MAES (MAES, 2013; MAES, 2014). Tento projekt síce prostredníctvom digitálneho atlasu poskytuje hodnotenie mnohých environmentálnych, regulačných aj kultúrnych funkcií, hodnotené sú však jednotlivé typy ekosystémov samostatne, pričom pôdy nie sú súčasťou všetkých z nich. Väčšinou sa sledovali indikátory nevhodné na naše účely. Práve ako napr. Barančíková a Madaras (2003), Barančíková a Makovníková (2003), Makovníková et al. (2007), Makovníková a Barančíková (2008), Vilček (2014) či Makovníková et al. (2013) venujúce sa potenciálom pôdy akumulovať vodu, filtrovať, imobilizovať alebo transformovať cudzorodé látky sú pre nás v mnohom inšpirujúce. Pracujú však iba

s databázami poľnohospodárskych pôd, resp. monitoringu pôd (ČMS Pôda), ktoré buď nepokrývajú celé územie SR, alebo údaje nie sú pri kľúčových indikátoroch kompatibilné s databázami rezortu životného prostredia. Pri potrebe účelového zobrazenia, modelovania niektorých funkcií alebo realizácie opatrení na celonárodnej úrovni tak absencuje nemalá časť územia SR, čo tiež otvára otázku potreby harmonizácie rezortných databáz a metódik v SR.

Súčasťou riešenej geologickej úlohy Zvaru et al. (2015) bolo okrem prezentovaného modelu potenciálnej sorpcie pôdy aj modelovanie na konkrétnych 87 lokalitách vybraných environmentálnych záťaží v SR. K všetkým boli zostavené syntetické modely rizík ohrozenia povrchu a povrchovej vody, pôdy a podzemnej vody. Takýto prístup umožnil komplexné posúdenie lokalít z hľadiska potenciálnej citlivosti, resp. odolnosti proti kontaminácii či geodynamickým javom v závislosti od pôdnych, geologických, geomorfologických a klimatických charakteristík. Modely rizík sú v zmysle metodiky vzájomne previazané, pričom výsledky modelu rizika kontaminácie povrchu a povrchovej vody v kombinácii s modelom sorpcie pôd sú stavebnými kameňmi modelu rizika kontaminácie pôd. Výsledky modelu rizika kontaminácie pôd v superpozícii so stupňom senzitivity podzemnej vody (model zraniteľnosti podzemnej vody) a faktormi hydrologickej bilancie tvoria základ výpočtu modelu rizika kontaminácie podzemnej vody. Tu je potrebné zdôrazniť, že všetky uvedené modely poukazujú len na potenciál územia, jeho citlivosť, resp. odolnosť proti možnému výskytu znečistenia a opisujú cesty, spôsoby správania a šírenia možného znečistenia.

Podakovanie

Kľúčové výsledky modelovania a výsledného zobrazenia indexu PSP boli dosiahnuté v rámci projektu *Geologický prieskum pravdepodobných environmentálnych záťaží metódami diaľkového prieskumu Zeme a modelovaním*, ktorý bol spolufinancovaný z Kohézneho fondu v rámci Operačného programu Životné prostredie, kód ITMS: NFP24140110303.

Literatúra / References

- ALLOWAY, B. J. (ed.), 1990: Heavy Metals in Soils. Glasgow – London, Blackie and Son, 339 s.
- ANTAL, B., DLAPA, P. a HANGÁČ, R., 2012: Návrh Smernice MŽP SR na zostavovanie súboru máp geologických faktorov životného prostredia v M 1 : 50 000, Príloha č. 4, Základné princípy zostavenia a súčasti pôdno-geochemickej mapy. Manuscript. Bratislava, archív MŽP SR.
- APIZ, S. E., BRILS, J., MARCONI, A., AGOSTINI, P., MICHELETTI, CH., PIPPA, R., SCANFERLA, P., ZIUN, S., LÁNCZOS, T., DERCOVÁ, K., KOČAN, A., PETRÍK, J., HUCKO, P. a KUŠNÍR, P., 2006: Approaches and Frameworks for managing contaminated sediments – A European Perspective. In: REIBLE, D. a LÁN-

- CZOS, T. (eds.): *Assessment and Remediation of Contaminated Sediments. IV Earth and Environmental Sciences – Vol. 73, NATO Science Series. Dordrecht, Springer, 246 s.*
- BARANČIKOVÁ, G. a MAKOVNÍKOVÁ, J., 2003: The influence of soil humic acid quality on sorption and mobility of heavy metals. *Plant Soil Environ.*, 49, 565 – 571.
- BARANČIKOVÁ, G. a MADARAS, M., 2003: Pokus o hodnotenie mimoprodukčných funkcií pôd – transformácia organických polutantov. In: SOBOCKÁ, J., JAMBOR, P. (eds.): *Zborník z vedeckej konferencie Druhé pôdoznalecké dni. Bratislava (VÚPOP – SPS)*, 105 – 110.
- BENTLEY, S., THIBODEAUX, L., ADRIAENS, P., LI, M. Y., ROMERO-GONZALEZ, M., BANWART, S. A., FILIP, Z., DEMNEROVA, K. a REIBLE, D., 2006: Physicochemical and biological assessment and characterization of contaminated sediments. In: REIBLE, D. a LÁNCZOS, T. (eds.): *Assessment and Remediation of Contaminated Sediments. IV Earth and Environmental Sciences – Vol. 73, NATO Science Series. Dordrecht, Springer, 246 s.*
- ČERNÁNSKÝ, S., URÍK, M., ŠEVC, J. a KHUN, M., 2007: Biosorption and biovolatilization of arsenic by heatresistant fungi. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 14, 31 – 35.
- ČURLÍK, J., 2011: Potenciálne toxické stopové prvky a ich distribúcia v pôdach Slovenska. Bratislava, PriF UK, Suma Print, 462 s.
- ČURLÍK, J. a ŠEFCÍK, P., 1999: Geochemický atlas SR. Časť V: Pôdy. Bratislava, MŽP SR – VÚPOP, 99 s.
- ČURLÍK, J. a JURKOVÍČ, E., 2012: Pedogeochémia. Vysokoškolská učebnica. Bratislava, PriF UK, 228 s.
- DEFRA, 2007: An introductory guide to valuing ecosystem services. London, Departm. Environ., Food Rur. Aff., 65 s.
- DERCOVÁ, K., ŠELIGOVÁ, J., DUDÁŠOVÁ, H., MIKULAŠOVÁ, M., ŠILHAROVÁ, K., TÓTHOVÁ, L. a HUCKO, P., 2009: Ecotoxicity and biodegradation of PCB-contaminated sediments. *Int. Biodeter. Biodegr.*, 63, 440 – 449.
- EEA, 2011: An experimental framework for ecosystem capital accounting in Europe. Technical report No 13/2011, European Environment Agency, 43 s.
- HALUŠKA, E., BALÁŽ, Š. a DERCOVÁ, K., 1993: Mikrobiálna degradácia polychlórovaných bifenylov. *Chem. Listy*, 87, 697 – 708.
- HILLER, E., 2003: Adsorpcia arzeničnanov na pôdach: štúdium rýchlosti adsorpcie a adsorpčných izoteriem. *J. Hydrol. Hydromech.*, 51, 4, 288 – 297.
- HILLER, E., ČERNÁNSKÝ, S. a TATARKOVÁ, V., 2011: Sorpcia priemyselných organických látok v pôdach a sedimentoch. Bratislava, Univerzita Komenského, 296 s.
- HRAŠKO, J. a BEDRNA, Z., 1988: Aplikované pôdoznalectvo. Bratislava, Príroda, 467 s.
- HUBER, S. a PROKOP, G., 2012: Progress in the management of contaminated sites. *EIONET Workshop on Soil, JRC Ispra*, 10 – 12 Dec. 2012.
- JACKSON, L. J., 1998: Paradigms of metal accumulation in rooted aquatic vascular plants. *Sci. Total Environ.* 219, 223 – 231.
- KHUN, M., ĐURŽA, O., MILČKA, J. a DLAPA, P., 2008: Environmentálna geochémia. Bratislava, Geografika, 278 s.
- LITTERA, P., URÍK, M., ŠEVC, J., KOLENČÍK, M., ANTOŠKA, R. a ČERNÁNSKÝ, S., 2008: Viazanie arzenu z prírodných kontaminovaných vôd rôznymi typmi (bio)sorbentov. In: Jurkovič, E., Đurža, O. a Slaninka, I. (eds.): *Geochémia 2008, zborník z konferencie. Bratislava, Št. Geol. Úst. D. Štúra*, 89 – 91.
- LOWRANCE, R., ALTIER, L. S., NEWBOLD, J. D., SCHNABEL, R. R., GROFFMAN, P. M., DENVER, J. M., CORRELL, D. L., GILLIAM, J. W., ROBINSON, J. L., BRINSFIELD, R. B., STAVER, K. W., LUCAS, W. a TODD, A. H., 1995: Water quality functions of riparian forest buffer systems in the Chesapeake Bay watershed. *Technology transfer report, August 1995, U. S. EPA, Annapolis*, 57 s.
- MAES, 2013: Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services. An analytical framework for ecosystem assessments under action 5 of the EU Biodiversity strategy to 2020. Luxembourg, Publications office of the European Union.
- MAES, 2014: Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services. Indicators for ecosystem assessments under Action 5 of the EU Biodiversity Strategy to 2020, 2nd Report-Final. Luxembourg, Publications office of the European Union.
- MAKOVNÍKOVÁ, J., BARANČIKOVÁ, G., DLAPA, P. a DERCOVÁ, K., 2006: Anorganické kontaminanty v pôdnom ekosystéme. *Chem. Listy*, 100, 424 – 432.
- MAKOVNÍKOVÁ, J., BARANČIKOVÁ, G. a PÁLKA, B., 2007: Approach to the assessment of transport risk of inorganic pollutants based on the immobilisation capability of soil. *Plant soil environ.*, 53, 8, 365 – 373.
- MAKOVNÍKOVÁ, J. a BARANČIKOVÁ, G., 2008: Transport risk of Cd and Pb on the basis of immobilization capability of soil. In: Hangáč, R. (ed.), 2008: *Contaminated sites Bratislava 2008 – Conference proceedings, Volume 2: Scientific Articles. Bratislava*, 68 – 71, ISBN 987-80-969958-2-0.
- MAKOVNÍKOVÁ, J., PÁLKA, B., ŠIRÁŇ, M. a PÁLKOVÁ, S., 2013: Filtračná funkcia pôdy ako jeden z komplexných indikátorov agroekosystémových služieb. In: KLIKUŠOVSKÁ, Z. a SVIČEK, M. (eds.): *Environmentálne indexy, agroenvironmentálne opatrenia a ekosystémové služby v krajine. Zborník z vedeckého seminára. Bratislava, VÚPOP*, 38 – 44.
- MALÍK, P., ŠVASTA, J., BAHNOVÁ, N., KOČICKÝ, D., IVANIČ, B., MARETA, M., ŠPILÁROVÁ, I. a ZVARA, I., 2012: Komplexná geologická informačná báza pre potreby ochrany prírody a manažmentu krajiny (GIB-GES). *Geol. Práce, Spr. (Bratislava)*, 118.
- MELČÁKOVÁ, I., 2008: Biosorption of heavy metals by algae biomass (*Chlorella vulgaris* and *Spirogyra* sp.). In: HANGÁČ, R. (ed.): *Contaminated Sites Bratislava 2008 – Conference proceedings, Volume 2. Bratislava*, 111 – 115, ISBN 987-80-969958-2-0.
- MIČIAN, E., 1977: Všeobecná pedogeografia. Skriptá. Bratislava, PriF UK, 154 s.
- PEŤKOVÁ, K., JURKOVÍČ, E., ŠIMONOVICHOVÁ, A., MOLNÁROVÁ, M. a SLEBODNÍKOVÁ, Z., 2014: Bioremediačný potenciál odstraňovania anorganických polutantov použitím *Aspergillus niger*. *Waste Forum*, 1 (2014), 25 – 28.
- SCHULTE, R. P. O., BAMPA, F., BARDY, M., COYLE, C., CREAMER, R. E., FEALY, R., GARDI, C., GHALEY, B. B., JORDAN, P., LAUDON, H., O'DONOGHUE, C., Ó'HUALLACHÁIN, D., O'SULLIVAN, L., RUTGERS, M., SIX, J., TOTH, G. L. a VREBOS, D., 2015: Making the Most of Our Land: Managing Soil Functions from Local to Continental Scale. *Frontiers Environ. Sci.*, 3, 81, doi: 10.3389/fenvs.2015.00081.

- SHIN, Y.-O., CHODAN, J. J. a WOLCOTT, A. R., 1970: Adsorption of DDT by soils, and biological materials. *J. Agric. Food Chem.* 18, 1 129 – 1 133.
- SLANINKA, I., ŠEFČÍK, P. a PRAMUKA, S., 2011: Geochemické mapovanie poľnohospodárskych pôd a pasienkov Európy – slovenská časť. Záverečná správa. *Manuskript. Bratislava, MŽP SR – archív Št. Geol. Úst. D. Štúra*, 150 s.
- ŠÁLY, R., 1998: Pedológia. Vysokoškolské skriptá. *Zvolen, TU vo Zvolene*, 177 s.
- TSEZOS, M. a SETO, W., 1986: The adsorption of chloroethanes by microbial biomass. *Water Res.*, 20, 7, 851 – 858.
- VILČEK, J., 2014: Mapping and evaluation of the environmental functions of agricultural soils in Slovakia. *Geogr. J.*, 66, 3, 287 – 304.
- VOLESKY, B. a HOLAN, Z. R., 1995: Biosorption of Heavy Metals. *Biotechnol. Progress*, 11, 235 – 250, doi:10.1021/bp00033a001.
- VRANA, B., BALÁŽ, Š., DERCOVÁ, K. a TANDLICH, R., 1998: Biosorpcia hydrofóbných organických polutantov. *Chem. Listy*, 92, 186 – 196.
- ZAUŠKOVÁ, L., 2003: Integrovaný manažment a ekologická únosnosť v povodiach vodárenských nádrží. *Vedecké štúdie* 4/2003/B. *Zvolen, TU vo Zvolene*, 85 s.
- ZVARA, I., PAUK, J., KOČICKÝ, D., BABIŠ, P., HUDEC, A., CHOVAN, J., IVANIČ, B., MARETTA, M., ŠPILÁROVÁ, I., ŠVEC, P., TURAČEK, D., VAZAN, V. a ZIGO, T., 2015: Geologický prieskum pravdepodobných environmentálnych záťaží metódami diaľkového prieskumu Zeme a modelovaním. Záverečná správa. *Manuskript. Bratislava, MŽP SR – Banská Štiavnica, ESPRIT*, 111 s.
- ŽEMBERYOVÁ, M., OKENICOVÁ, L., BARTEKOVÁ, J., ŠIMONOVICHOVÁ, A. a GÁPLOVSKÁ, K., 2014: Bioaccumulation of heavy metals from aqueous solutions by live biomass of *Aspergillus niger* wild type strains isolated from different environments. *Fres. Environ. Bull.*, 23, 2A, 597 – 602.

Modelling of the sorption properties of soils in Slovakia for the purposes of geological information system

In a need of purposeful visualization and modelling of environmental functions of the soil, or implementation of measures at national level, there is a lack of large areas at present, due to a low level of departmental databases and methodologies harmonization in the Slovak Republic. Just this need for modelling of environmental functions of soils for the whole territory of Slovakia in terms of ability for sorption of pollutants has led us to design a calculation (Antal et al., 2012) and implementation of the model and imaging of the map (Zvara et al., 2015). The PSP (sorption potential of soil) index was calculated for the modelling of soil properties from the data which are available for years in the national databases of geochemical survey, and which are crucial for schematic expression of sorption capacity rate of soils. The calculation includes information on active soil reaction (pH/H₂O), organic matter content (OH), content of the clay fraction (OI) and the thickness of the A horizon (h_{AH}). Calculation was carried out through the score assigned to each range of values OH, OI and pH. Algorithm takes into account the score values through basic physico-chemical processes and the impact of different pH values on the function of organic matter and clay minerals in the soil. Score of these values is multiplied by the score value of the A horizon thickness and run according to following formula:

PSP ((OH. pH_OH) + (OI. pH_OI)). h_{AH}. Given by the limited scope, variability or quality of archive data, we focused only on indicators that have been captured in all departmental databases and are crucial for sorption processes in the soil. After calculation of selected indicators, the archived databases received a new added value. An example of resulting visualization of the potential sorption of the soil at the selected location with the environmental burden created using described model is shown in Fig. 5. The resulting map of potential sorption of soil, prepared for the whole territory of Slovakia, is suitable for eventual incorporation into the current geo-information systems (GeoIS, IMK, soil map portal, etc.) and is shown in Fig. 6. The interpretation applies an inverse relationship between the value of sorption potential and risks associated with the soil contamination. The lower value of potential sorption represents a higher risk of mobility, or toxic action of contaminants entering the soil. It should be pointed out that the model indicates only the potential of the territory, its sensitivity, resp. the resistance to the possible occurrence of contamination.

Doručené / Received: 22. 8. 2016
Prijaté na publikovanie / Accepted: 15. 12. 2016

Geochemické hodnotenie environmentálnych rizík na lokalite opusteného Hg ložiska Merník (východné Slovensko)

LUBOMÍR JURKOVIČ¹, PETER ŠOTTNÍK¹, PETER SEKULA¹, KATARÍNA PEŤKOVÁ¹, JURAJ KOTÚČ²,
JÁN LEŠŠO², MIROSLAV BAČIK², EDGAR HILLER¹ a VLADIMÍR MALÝ³

¹ Univerzita Komenského v Bratislave, Prírodovedecká fakulta, Ilkovičova 6, 842 15 Bratislava

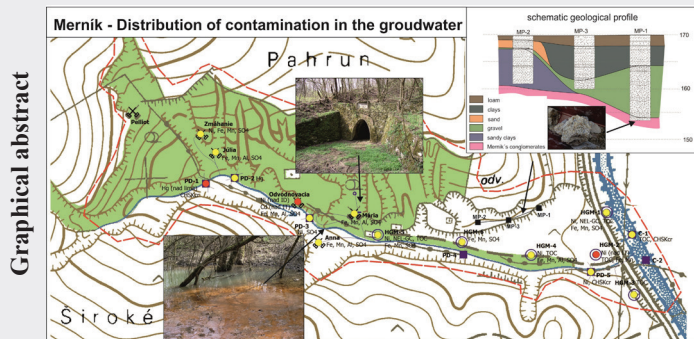
² ENVIRONCENTRUM, s. r. o., Rastislavova 58, 040 01 Košice

³ Ministerstvo životného prostredia SR, Sekcia geológie a prírodných zdrojov, Nám. L. Štúra 1,
812 35 Bratislava

Geochemical evaluation of environmental risks in locality of abandoned Hg-deposit Merník (Eastern Slovakia)

Abstract: Geological survey on the site of Merník has defined the nature of pollutants, encompassing inorganic substances with mercury, antimony and nickel (geogenic origin) as the risk elements, as well as typical materials of mine sites exceeding limit values – Fe, Mn, or sulphates. The primary source of pollution in the study area is represented by the heaps and impoundments, which are washed by the water and weathering process, causing the soil and surface water pollution. Leaking water from the mine shafts represents a secondary source of pollution of the surface waters in the western area, though due to the low outflows of the water from all monitored shafts, the mine water does not pose a significant risk.

Key words: environmental burden, Hg, geochemical evaluation of contamination, abandoned deposit, Merník



Environmental burden “Merník – Hg mines” is a product of weathering of local rocks, bearing hazardous elements in mineral phases (Hg, Sb, Fe, Mn and sulphates), as well as ultramafic pebbles in conglomerates (source of Ni), combined with the long term Hg ores mining and processing effects (mine waste and water outflows from adits)

Úvod

Charakter environmentálnej záťaže (EZ) *Merník* – *ortuťové bane* súvisí s dlhodobo vykonávanou ťažbou, spracovaním a úpravou ortuťovej rudy na lokalite Merník. Ložisko je známe od konca 17. storočia, najintenzívnejšia exploatácia ložiska prebiehala od r. 1923 s maximálnou ťažbou v rokoch 1935 – 1936 (32 t kovu). Pre vyčerpanie zásob sa v roku 1937 prevádzka definitívne zastavila a v roku 1940 bola baňa zatopená (Daniel et al., 2003). Študovaná lokalita je typickým príkladom zaťaženej oblasti po ukončenej banskej činnosti, kde potenciálnym zdrojom znečisťujúcich látok sú najmä banská voda, haldy vzniknuté po ťažobnej činnosti a odpad zo spracovania Hg

rudy. Haldy (odvaly) sú vo veľkej miere zarastené, a preto je veľmi ťažké ich identifikovať a odhadnúť množstvo depozovaného materiálu (obr. 1). V minulosti boli významným zdrojom úniku ortuti do životného prostredia exhaláty vypúšťané do ovzdušia bývalým závozom na úpravu Hg rudy. Ortuť, ktorá sa dostávala do ovzdušia, dopadala vo forme prášneho spadu na povrch na relatívne rozsiahlom území a spôsobovala kontamináciu pôdy a flóry v neznámom rozsahu.

Lokalita opusteného ložiska Merník sa nachádza v Prešovskom kraji (okr. Vranov nad Topľou, východné Slovensko). Od obce Merník je vzdialená asi 1,3 km na JZ. Je situovaná na konci údolia Potkania debra a ústi do toku Čičava. Študované územie je evidované v Registri envi-

ronmentálnych zát'aží (SAŽP) ako environmentálna zát'až VT [(018)/Merník – ortuťové bane – SK/EZ/VT/1024, Register B].

Táto štúdia prezentuje výsledky prieskumu environmentálnej zát'aže Merník získané v rámci geologickej úlohy *Prieskum prioritných environmentálnych zát'aží na vybraných lokalitách Košického a Prešovského kraja: Poproč – Petrova dolina, Smolník – ťažba pyritových rúd, Merník – ortuťové bane, časť 16* (súčasť úlohy MŽP SR *Prieskum environmentálnych zát'aží na vybraných lokalitách SR*).

GEOLOGICKÉ POMERY ŠTUDOVANEJ OBLASTI

Širšie okolie mernického rudného poľa leží na jz. okraji vnútrokarpatského paleogénu, na priesečníku močariansko-topoliánskeho zlomového systému a je súčasťou rudného rajónu Slanských vrchov (Ilavský a Satran, 1980). Územie je tvorené hlavne kvartérnymi sedimentmi, sedimentmi molasy Východoslovenskej nížiny, neogénnym vulkanickým komplexom a flyšovým súvrstvom vnútrokarpatského paleogénu (obr. 2).

Kvartér je zastúpený súvislým pokryvom prolúviálnych sedimentov s hrúbkou 5 – 6 m. Na jv. strane kóty Lipová (310,6) sú deluviálne sedimenty, v prevažnej časti zložené z úlomkov ryodacitu, a na svahoch roklin Lasch a Potkania debra sú splachové rezíduá z úlomkov zlepenecov a ryodacitov. Na zložení kvartérnych sedimentov sa vo významnej miere podieľajú aj antropogénne navážky vo forme odvalov a zvyškov po banskej činnosti. Neogénne súvrstvia ílovcov, prachovcov a pieskov nemajú vzťah k ložisku Merník. Najvýznamnejším geologickým činiteľom v študovanom území je neogénny vulkanizmus, ktorého produkty intruzívneho charakteru zaraďujeme do bádenu až spodného sarmatu (Vass et al., 1987). Významnú úlohu pri vzniku a distribúcii ryodacitového vulkanizmu zohral močariansko-topoliánsky zlomový systém (vrchný bádén) na priesečníku so ssv.-jz. zlomovým systémom. V mernickej oblasti boli overené dva základné prírodné systémy (Daniel et al., 2003) – kóta Lipová a Urbársky les – a dajky s radiálnym a koncentrickým usporiadaním. Obe dva systémy predstavujú (na základe morfológie a fluidálnosti telies) erozívne odkrytú podpovrchovú intruzívnu časť zložitého intruzívno-extruzívneho telesa. Po litofaciálnej stránke vnútornú časť týchto telies tvoria masívne porfyrické ryodacity. Ostatné zistené telesá sú koncentricky aj radiálne zoskupené okolo s., sv., v. a jz. okrajov prírodných telies. Všetky intruzívne telesá ryodacitu a vulkanického skla oboch základných skupín sú hydrotermálne alterované. Ortuťová mineralizácia je najčastejšie vyvinutá v ryodacitoch postihnutých argilitizáciou a má žilnikovo-impregnačný charakter. Telesá ryodacitov sa vyskytujú hlavne v ílovcovom a iba sporadicky v zlepencovom prostredí. Zlepencový vývoj je vyvinutý

v nadloží typického flyšu s prevahou pieskovcov a v podloží typického flyšu s prevahou ílovcov až prachovcov. Celý komplex typického flyšu bol priradený k flyšu zubeckého súvrstvia (Baňacký et al., 1987) s polohou mernických zlepenecov (Gross et al., 1984).

V priestore mernického rudného poľa sa rozlišujú tri rudné štruktúry (Bačo et al., 1988). Rudné telesá sú priestorovo viazané na ryodacitové telesá, ktorých hrúbka je v priemere 15 až 25 m, a hrúbka bilančného zrudnenia v rámci rudných telies je 0,90 – 7,32 m. Hlavným nositeľom zrudnenia je rumelka. Tvorí jemné až submikroskopické zrnká v intergranulárach ryodacitov alebo v tmele zlepenecov a pieskovcov (Ďuďa a Kaličiaková, 1987). V týchto prípadoch ju sprevádzajú markazit, ílové a organické minerály a zemitý vosk. Rumelka v žilkách má hrubší kryštalický vývoj, kde ju sprevádzajú dolomit, kalcit, chalcedón, pyrit, markazit a organické a ďalšie minerály. Na ložisku bolo určených vyše 40 minerálov. Ložisko je zaradené medzi vulkanogénno-vulkanické ložiská (Daniel et al., 2003). Celkovo sa na ložisku rozlišujú 3 etapy vývoja mineralizácie (etapa hydrotermálnych premien hornín, polymetalická a supergénná ortuťová).

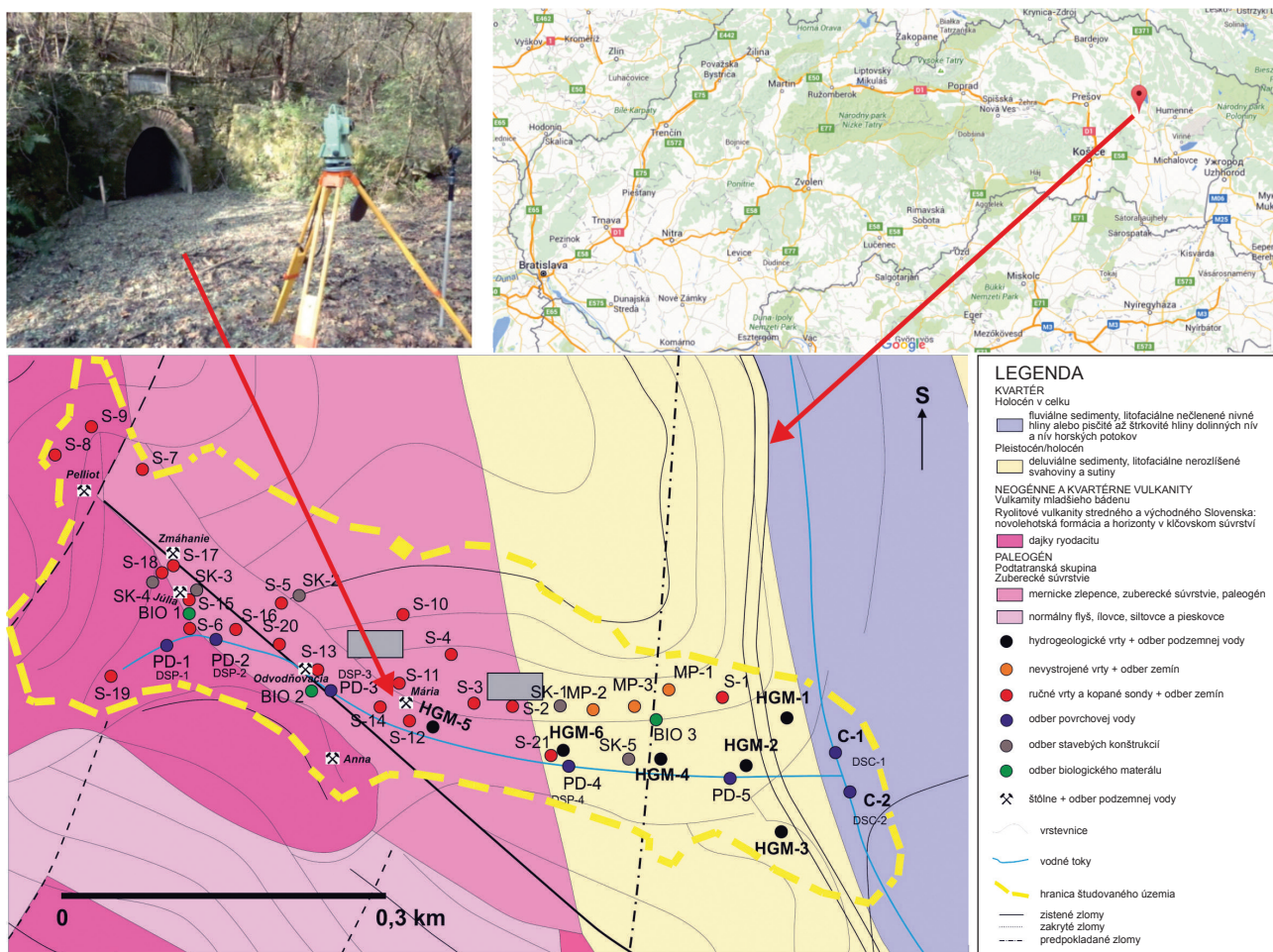
Ťažobné aktivity v mernickom rudnom poli boli lokalizované vo viacerých štôľňach a produkty ťažobných aktivít vo forme odvalov a banských hald sa vyskytujú v bezprostrednej blízkosti týchto štôľní (obr. 3). Počas prieskumných prác v roku 2003 (Daniel et al., 2003) a na základe registra opustených a uzavretých ťažobných odpadov boli na lokalite *Merník – ortuťové bane* identifikované nasledujúce štôľne, odvaly a haldy: štôľňa Mária a odval pri štôľni (priem. výška odvalu 35 m, plocha 32 000 m²), šachta Pelliot a odval pri šachte (priem. výška odvalu 10 m, plocha 8 000 m²), štôľňa Zmáhanie, štôľňa Júlia (asi 2 500 m chodieb) a odval pri štôľni (priem. výška odvalu 5 m, plocha 2 000 m²), Odvodňovacia štôľňa a odval, štôľňa Anna a odval pri štôľni (priem. výška odvalu 35 m, plocha 30 000 m²) a odval Merník 3 (priem. výška odvalu 1 m, plocha 1 000 m²).

Hydrogeologické pomery študovaného územia sú pomerne komplikované najmä vo vzťahu k rozfáraníu opusteného ložiska. Smer prúdenia podzemnej vody závisí od tektonického porušenia horninového prostredia. Nepatrná priepustnosť nadložných ílovcových hornín sa prejavuje častým zamokrením povrchu a prítomnosťou vody v množstve zosuvov a výskytom väčšieho počtu malých sutinových prameňov. Pramene v skúmanom území závisia od zrážok. V suchších obdobiach sa znižuje ich výdatnosť a v mnohých prípadoch úplne vysychajú. Výtoky z banských diel nie sú závislé od zrážkových pomerov a ich výdatnosť je relatívne stabilná (okrem jarných mesiacov, keď je voda dotovaná topiacim sa snehom). Voda vo forme zrážok infiltruje do banských diel buď priamo cez trhliny a pukliny, alebo po prekonaní určitej dráhy v podzemí ako podzemná voda. Výtoky banskej vody



Obr. 1. Súčasný stav hald a výtokov banskej vody na lokalite Merník – ortuťové bane.

Fig. 1. Current situation of mine heaps and mine water outflows from adits in the locality Merník – Hg mines.



Obr. 2. Schematická geologická mapa lokality Merník s lokalizáciou prieskumných diel a ošberových miest.

Fig. 2. Schematic geological map of the Merník locality with location of exploration and sampling points.

sú zaznamenané zo štôlne Anna ($0,46 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$), štôlne Júlia a z odvodňovacej šachty ($2,0 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$). Tieto výtoky dotujú potok Potkania debra, ktorý preteká študovaným územím zo západu na východ. Okrem týchto prítokov je zreteľné aj presakovanie do potoka Potkania debra v okolí týchto banských diel. Potok Potkania debra tvorí pravostranný prítok potoka Čičava, ktorý tvorí erozívnu bázu študovaného územia (Auxt et al., 2015).

Hydrogeochemické pomery na opustenom ložisku Merník sú výsledkom viacerých geologických procesov pri tvorbe chemického zloženia podzemnej vody. Podzemná voda na ložisku Merník má aerogénny pôvod, pričom vstupujúca voda sa po infiltrácii do horninového prostredia vyznačuje zvýšenou mineralizáciou. Celková mineralizácia podzemnej vody sa pohybuje priemerne okolo $650 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ a v prípade banskej vody je vyššia, maximálne $1\,450 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ (podzemná voda je obohatená o sírany a ťažké kovy). Na formovaní mineralizácie sa veľkou mierou podieľa prítomnosť aniónu SO_4^{2-} , ktorý pochádza zo zvetrávania sulfidov vytvárajúcich zrudnenie ložiska. Najviac sú v podzemnej vode zastúpené kationy Mg^{2+} a Ca^{2+} , z aniónov SO_4^{2-} a HCO_3^- , ktoré dávajú vode prevažne základný nevýrazný vápenato-horečnato-sulfidicko-hydrogenkarbonátový charakter, banská voda má základný nevýrazný horečnato-sulfidicko-hydrogenkarbonátový charakter. Agresivitu vody spôsobuje prítomnosť SO_4^{2-} (Daniel et al., 2003).

METODIKA PRÁCE

Kvôli odberu vzoriek pevných substrátov pôdy a zemín z pásma prevzdušnenia a pásma nasýtenia sa realizovali vrtné práce. Pozostávali zo strojových prieskumných nevystrojených vrtov (MP-1, MP-2, MP-3) v celkovej dĺžke 35 m a hydrogeologických monitorovacích vrtov (HGM-1 až HGM-6) v celkovej dĺžke 50 m (obr. 2). Okrem toho sa uskutočnilo 21 ručných nevystrojených vzorkovacích sond, ktoré slúžili na overenie zonálneho rozsahu kontaminácie v banských odvaloch (S-1 až S-9) a dnových sedimentoch (S-10 až S-21). Sondy sa robili ručnou vzorkovacou súpravou Eijkelkamp za použitia zemného vrtáka s priemerom 70 mm. Hĺbka odberu zo sond bola do 4 m pod terénom v haldách a odvaloch, v miestach sedimentácie precipitátov z výtoku banskej vody to bolo okolo 2 m pod terénom a celková hĺbka výkopov dosiahla 60 m.

Počas prieskumných prác sa odoberali vzorky vody z výtokov štôlní (banská voda), v hydrogeologických vrtoch (podzemná voda) a z povrchových tokov Potkania debra a Čičava (povrchová voda). Počas odberu vzoriek podzemnej a povrchovej vody sa kontinuálne merali hodnoty základných parametrov vody (teplota, pH, ORP, vodivosť, rozpustený O_2) pomocou multiparametrického zariadenia CONSORT C535. Pri odberoch vzoriek pod-

zemnej vody z hydrogeologických vrtov sa voda odčerpávala a až následne sa odoberala vzorka na ďalšie analytické spracovanie.

Laboratórne analýzy vzoriek vody a pevných substrátov vzoriek pôdy, zemín a riečnych sedimentov v rozsahu stanovení podľa projektu (Vrana et al., 2014) sa realizovali v akreditovaných laboratóriách firmy EKOLAB, s. r. o (Košice). Rozsah chemických analýz vody zahŕňal základné ukazovatele kvality vody, obsah anorganických látok (As, Sb, Cu, Pb, Zn, Ag, Cd, Cr, Ni, V, Mo, Ba, Fe, Al, Mn, Hg, NH_4^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , CHSK_{Cr}) a antropogénne znečisťujúcich látok organickej povahy (NEL-IR, $\text{C}_{10}-\text{C}_{40}$, PAU, BTEX) a stanovenie ekotoxicity a mikrobiálneho osídlenia na vybraných vzorkách. V prípade pevných substrátov pôdy, zemín a dnových sedimentov (natívne vzorky) sa zisťovala škála parametrov: pH, TOC, As, Sb, Cu, Pb, Zn, Ag, Hg, Cd, Cr, Ni, V, Mo, Ba, Fe, Al, Mn, CN_{celk} , CN_{tox} , NEL_{IR} , $\text{C}_{10}-\text{C}_{40}$, S_{sulf} , PAU a BTEX.

Výsledky prieskumných prác boli spracované v zmysle smernice MŽP SR č. 1/2015-7 z 28. januára 2015 na vypracovanie analýzy rizika znečisteného územia stanovujúcej náležitosti prieskumných prác a definujúcej indikačné (ID) a intervenčné (IT) hodnoty jednotlivých médií životného prostredia, ktoré sa hodnotia pri prieskume environmentálnych záťaží na Slovensku.

ZÍSKANÉ VÝSLEDKY

Problematika kontaminácie lokality Merník a exaktného hodnotenia environmentálnych rizík tejto environmentálnej záťaže (EZ) je komplikovaná vzhľadom na geologickú stavbu priestoru opusteného Hg ložiska v Merníku a prítomnosť geologických súvrství s geogénne podmieneným vysokým obsahom niektorých kontaminantov. Situáciu významne ovplyvňuje deponovanie produktov spracovania ťažených rúd na odvaloch a haldách v priestore ťažby a spracovania rudy vrátane viacerých výtokov banskej vody zo štôlní. Ako dominantné rizikové látky boli identifikované prvky Hg, Sb a Ni, pričom v prípade Ni ide o geogénne podmienenú kontamináciu širšieho regionálneho charakteru (Čurlík et al., 2011, 2015; Ďurža et al., 2012).

Technické práce (nevystrojené vrty MP-1 až MP-3 a HG vrty HGM-1 až HGM-6) potvrdili litologický profil vrchnej časti priestoru opusteného Hg ložiska Merník, charakterizovaný kvartérnym pokryvom s rôznym zložením (hliny, piesky, úlomky hornín a antropogénne sedimenty – materiál hald a odvalov). Tieto zložky postupne prechádzajú do polohy paleogénnych sedimentov, ktoré reprezentujú mernické zlepenice zubereckého súvrstvia vo východnej časti študovaného územia a typický flyš (pieskovce, ílovce, siltovce) paleogénu v západnej časti. Mernické zlepenice (obr. 4) sa potvrdili aj vrtnými prácami vo vrtach MP-1 a HGM-2 na východnom okraji územia

(Auxt et al., 2015). Práve zvetrávanie horninového matricu týchto zlepcov je zdrojom zvýšeného obsahu niklu v zeminách v pásme prevzdušnenia študovanej oblasti. Uvedená skutočnosť potvrdzuje staršie práce opisujúce Ni-Co mineralizáciu obliakov ultrabázik mernického zlepenca (Ďuďa a Kaličiaková, 1987), ktoré v poslednom čase vo forme interpretácie geogénne podmienenej kontaminácie pôd paleogénu niklom a chrómom na východnom Slovensku rozpracovali Čurlík et al. (2011, 2015) a Kolesár (2015).

Chemické zloženie banskej a podzemnej vody

Získané výsledky laboratórnych analýz podzemnej vody štôlní (tab. 1) a hydrogeologických vrtov (tab. 2) z jednotlivých odberov identifikujú hodnotenú vodu ako stredne mineralizovanú, s neutrálnou reakciou (pH 6,90 ~ 7,11), s hodnotami konduktivity v rozsahu 118 ~ 128 mS · m⁻¹. V podzemnej vode pochádzajúcej z výtokov štôlní (banská voda) neboli identifikované rizikové kontaminanty Hg, Sb ani As (vo všetkých vzorkách boli hodnoty nižšie ako detekčný limit analytickej metódy). Ojedinelé prekročenia hodnôt indikačného kritéria (ID) boli stanovené pri parametri Ni vo výtoku zo štôlní Zmáhanie a Odvodňovacia (s maximálnym obsahom 141 µg · l⁻¹ vo výtoku zo štôlnie Zmáhanie), ktoré však nedosahujú hodnoty limitu intervenčného kritéria (IT) podľa smernice MŽP SR č. 1/2015-7. Zvýšený obsah Ni v podzemnej vode štôlní predstavuje prirodzenú, geologicky podmienenú koncentráciu vo vode, ktorej genéza je ovplyvnená obehom vody cez súvrstvia so zvýšeným obsahom Ni (zuberecké súvrstvie). V podzemnej vode štôlnie Odvodňovacia bola stanovená zvýšená hodnota kadmia (= 26 µg · l⁻¹) prekračujúca limitnú úroveň IT stanovenú pre Cd, táto hodnota je však v celom súbore chemických analýz všetkých odbraných vzoriek podzemnej vody ojedinelá (všetky ostatné stanovenia Cd boli nižšie ako detekčný limit).

Charakter banskej vody vytekajúcej zo štôlní reprezentujú hodnoty síranov, mangánu a železa (celkové), prípadne Fe²⁺. Smernica MŽP SR č. 1/2015-7 však neurčuje hodnoty IT a ID parametrov Fe_{celk.}, Mn a sírany (SO₄²⁻) v podzemnej vode, pričom v banských lokalitách práve parametre Fe a SO₄²⁻ predstavujú dôležité ukazovatele celkovej kontaminácie podzemnej vody. Voda vytekajúca zo štôlní na lokalite Merník prekročovala medznú hodnotu (MH) obsahu síranov (250 mg · l⁻¹ – podľa prílohy č. 1 nariadenia vlády SR č. 496/2010 Z. z.) s priemernou hodnotou okolo 604 mg · l⁻¹ aj MH parametrov Fe_{celk.} a Mn. V prípade Fe a Mn vo vode nejde o rizikové parametre vo vzťahu ku kontaminácii životného prostredia. Zvýšený obsah Fe v tejto vode má za následok precipitáciu Fe okrov v priľahlých terénnych depresiách, kde sa táto voda sústreďuje. Koncentrácia Fe sa pohybuje v hodnotách prekračujúcich MH asi 10-násobne, s maximálnymi hodnotami

v zimnom období (1/2015), s nameraným maximom vo výtoku zo štôlnie Júlia (= 20,2 mg · l⁻¹) pri zanedbateľnom prietoku 0,014 l · s⁻¹.

V prípade podzemnej vody študovanej oblasti odobieranej v hydrogeologických vrtoch (HGM-1 až HGM-6) platia podobné zistenia ako v prípade podzemnej vody zo štôlní. Stanovené rizikové kontaminanty (Hg, Sb a As) vo väčšine vzoriek vody vykazovali hodnoty nižšie ako medza stanoviteľnosti použitej analytickej metódy. Prekročenie úrovne ID sa zaznamenalo pri obsahu Ni v podzemnej vode vo vrtoch HGM-1 = 101 µg · l⁻¹, HGM-4 = 169,7 µg · l⁻¹, resp. HGM-5 = 121 µg · l⁻¹. Prekročenie úrovne IT_{Ni} sa zaznamenalo pri maximálnej stanovenej hodnote 344 µg · l⁻¹ Ni vo vzorke podzemnej vody vo vrte HGM-2. Rizikový kontaminant ortuť sa v podzemnej vode zistil len zriedkavo. Prevažná väčšina vzoriek podzemnej vody z hydrogeologických vrtov bola z hľadiska prítomnosti Hg negatívna (pod detekčným limitom). Pri stanovenom obsahu Hg boli hodnoty pod úrovňou ID_{Hg} = 2 µg · l⁻¹ (HGM-1 = 0,66 µg · l⁻¹, HGM-4 = 0,31 µg · l⁻¹, HGM-6 = 0,22 µg · l⁻¹). Typický charakter podzemnej vody viazanej na opustené banské priestory odráža zvýšená stanovená koncentrácia Mn, Fe_{celk.} a SO₄²⁻ (obr. 5).

Typický charakter podzemnej vody viazanej na opustené banské priestory a odrážajúcej litologické zloženie geologického prostredia reprezentuje aj v podzemnej vode z hydrogeologických vrtov obsah síranov a železa (celkového). Platí obdobná situácia ako pri podzemnej vode zo štôlní. Vo viacerých odberoch vody sa zaznamenal zvýšený obsah Mn, Fe_{celk.} a SO₄²⁻. V prípade Fe boli zvýšené hodnoty stanovené vo všetkých vrtoch v opakovaných meraniach, s výnimkou vrtu HGM-3, pričom hodnota Fe_{max} = 18 mg · l⁻¹ bola stanovená vo vrte HGM-1, ktorý je situovaný v alúviu potoka Čičava. Aj v prípade síranov boli stanovené viaceré hodnoty prekračujúce MH určenú pre sírany (250 mg · l⁻¹ – podľa prílohy č. 1 NV č. 496/2010 Z. z.) s dvomi maximálnymi hodnotami v odlišných častiach územia – vrt HGM-1 (793,9 mg · l⁻¹) v alúviu Čičavy, resp. vrt HGM-5 = 832,3 mg · l⁻¹ situovaný v centrálnej časti opusteného ložiska Merník. Vzhľadom na to, že smernica MŽP SR 1/2015-7 neurčuje hodnoty IT a ID pre Fe_{celk.} a sírany v podzemnej vode, uvedené zistenia identifikujú prítomnosť banskej vody, ktorá z dlhodobého hľadiska môže predstavovať riziká pre životné prostredie v danej lokalite.

Na základe získaných výsledkov z prieskumu možno konštatovať, že v študovanom území ide o typické znečistenie podzemnej vody v oblastiach po banskej a úpravnickej činnosti so zvýšenými hodnotami obsahu Fe, Mn a síranov, ale s nízkym obsahom potenciálne toxických prvkov oproti iným banským lokalitám na Slovensku (Ženišová et al., 2009, 2015; Bajtoš, 2016; Dadová et al., 2016).



Obr. 3. Lokalizácia odvalov v opustenom Hg ložisku Merník.
Fig. 3. Location of dumps at abandoned Hg-deposit Merník.



Obr. 4. Natívne vzorky merníckych zlepcov (vrt MP-1).
Fig. 4. Native samples of “Merník” conglomerates (borehole MP-1).

Kvalita povrchovej vody

Kvalita povrchovej vody bola vyhodnotená na základe chemických analýz odobraných vzoriek vody z dvoch rôznych tokov – Potkánia debra a Čičava. Potok Potkánia debra drénuje celú dolinu študovaného územia, kde sú situované všetky banské diela, a najmä výtoky banskej vody z jednotlivých štôlní. Povrchová voda je dotovaná aj presakovaním z odvalov a hald v území. Na potok Potkánia debra sa viažu odbery povrchovej vody z miest PD-1 až PD-5. Druhý skúmaný potok je potok Čičava, do ktorého ústi potok Potkánia debra (vzorka C-1 – nad prítokom potoka Potkánia debra, vzorka C-2 – pod sútokom).

Kvalita povrchovej vody bola vyhodnotená na základe porovnania stanovených hodnôt jednotlivých pa-

rametrov s medznými hodnotami prílohy č. 1 nariadenia vlády SR č. 269/2010 Z. z. (všeobecné požiadavky na kvalitu povrchovej vody). Problémom pri hodnotení kvality povrchovej vody je absencia medznej hodnoty (MH) obsahu Sb. Z chemických analýz opakovaných odberov povrchovej vody (Auxt et al., 2015) vyplýva, že v zmysle nariadenia vlády SR č. 269/2010 Z. z. povrchová voda študovaného územia nevykazuje znaky kontaminácie vo väčšine hodnotených parametrov, s výnimkou ojedinelého prekročenia parametra TOC (vzorka C-1), síranov (vzorka PD-3 = 264,8 mg · l⁻¹) a limitných hodnôt CHSK_{Cr} (PD-1, PD-5, C-1).

Nadlimitné hodnoty stanovené pre povrchovú vodu boli zaznamenané pri parametroch Hg a Ni ako potenciálne rizikových kontaminantoch tejto oblasti. V prípade

Tab. 1

Hodnoty vybraných parametrov chemického zloženia podzemnej vody z výtokov štôlní (odberové termíny).
Values of selected chemical parameters of groundwater from adit outflows (for sampling dates).

Ukazovateľ		Kritérium		29. 10. 2014				
		ID	IT	Mária	Zmáhanie	Odvodňovacia	Júlia	Anna
Arzén (As)	$\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$	50	100	1,6	2,3	< DL	3,5	1,5
Ortuť (Hg)	$\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$	2	5	< DL	< DL	< DL	0,23	< DL
Nikel (Ni)	$\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$	100	200	< DL	53	127	91,5	68,7
Antimón (Sb)	$\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$	25	50	< DL	< DL	1,342	< DL	< DL
Železo celk. (Fe)	$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	0,2		0,141	0,335	< DL	0,929	0,968
Mangán (Mn)	$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	0,2		0,365	2,34	0,92	3,31	3,41
Hliník (Al)	$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	0,2		< DL	0,066 1	< DL	< DL	< DL
Chloridy (Cl ⁻)	$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	150	250	28,9	17,7	12,3	17,5	11,2
Sírany (SO ₄ ²⁻)	$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	250		680,6	534,7	632,1	545,4	601,8
Ukazovateľ		Kritérium		5. 11. 2014				
		ID	IT	Mária	Zmáhanie	Odvodňovacia	Júlia	Anna
Arzén (As)	$\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$	50	100	4,9	1,4	3,7	2,7	3,2
Bárium (Ba)	$\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$	1 000	2 000	nd	nd	821	nd	nd
Kadmium (Cd)	$\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$	5	20	nd	nd	26	nd	nd
Ortuť (Hg)	$\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$	2	5	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL
Nikel (Ni)	$\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$	100	200	< DL	46	98,6	75,4	53,5
Antimón (Sb)	$\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$	25	50	0,004 2	< DL	< DL	< DL	< DL
Železo celk. (Fe)	$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	0,2		0,023	0,148	4,480	0,803	1,120
Mangán (Mn)	$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	0,2		0,116	2,34	1,14	3,58	3,97
Hliník (Al)	$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	0,2		< DL	< DL	< DL	0,017 4	< DL
Chloridy (Cl ⁻)	$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	150	250	30	15,9	13,1	17,7	11,6
Sírany (SO ₄ ²⁻)	$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	250		684,8	519,8	673,9	532,1	671,1
Ukazovateľ		Kritérium		28. 11. 2014				
		ID	IT	Mária	Zmáhanie	Odvodňovacia	Júlia	Anna
Arzén (As)	$\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$	50	100	3,3	4,5	4,4	< DL	2,4
Ortuť (Hg)	$\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$	2	5	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL
Nikel (Ni)	$\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$	100	200	27	141	93,2	95,3	42,4
Antimón (Sb)	$\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$	25	50	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL
Železo celk. (Fe)	$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	0,2		0,694	0,574	6,38	1,5	1,24
Mangán (Mn)	$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	0,2		4,81	1,37	1,05	2,99	3,56
Hliník (Al)	$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	0,2		0,412	0,119	0,114	0,243	0,235
Sírany (SO ₄ ²⁻)	$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	250		nd	nd	564,4	nd	nd
Ukazovateľ		Kritérium		13. 1. 2015				
		ID	IT	Mária	Zmáhanie	Odvodňovacia	Júlia	Anna
Arzén (As)	$\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$	50	100	3,9	1,8	1,5	1,1	1,0
Ortuť (Hg)	$\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$	2	5	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL
Nikel (Ni)	$\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$	100	200	27	39,4	102	84,7	63,4
Antimón (Sb)	$\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$	25	50	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL
Železo celk. (Fe)	$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	0,2		5,82	0,118	6,59	20,2	16
Mangán (Mn)	$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	0,2		3,69	1,3	0,887	2,73	3,07
Hliník (Al)	$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	0,2		< DL	< DL	< DL	0,016	< DL

Poznámka: < DL – hodnota nižšia ako detekčný limit, nd – nestanovovaná hodnota, IT – intervenčné kritérium pre priemysel, parametre Fe, Mn, Al a SO₄²⁻ – kritérium MH z NV č. 496/2010 Z. z.

Note: < DL – value below the detection limit, nd – not determined value, IT – intervention criterion for industry, parameters Fe, Mn, Al and SO₄²⁻ – criterion of MH from NV No. 496/2010 Coll.

Tab. 2

Hodnoty vybraných parametrov chemického zloženia podzemnej vody z hydrogeologických vrtov.
Values of selected chemical parameters of the groundwater from hydrogeological boreholes.

Ukazovateľ		Kritérium		29. 10. 2014					
		ID	IT	HGM-1	HGM-2	HGM-3	HGM-4	HGM-5	HGM-6
Arzén (As)	$\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$	50	100	2,2	3,2	2,1	2,0	2,4	< DL
Bárium (Ba)	$\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$	1 000	2 000	909	420	549	705	794	nd
Ortuť (Hg)	$\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$	2	5	0,66	< DL	< DL	0,31	< DL	0,22
Nikel (Ni)	$\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$	100	200	8,0	49,2	12,9	94,6	95,4	32,9
Antimón (Sb)	$\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$	25	50	< DL	1,784	1,166	1,089	< DL	< DL
Železo celk. (Fe)	$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	0,2		2,66	0,428	0,093	0,383	1,38	0,638
Mangán (Mn)	$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	0,2		9,03	5	0,012	2,56	1,25	0,351
Hliník (Al)	$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	0,2		0,085 4	0,171	< DL	0,254	< DL	nd
NH_4	$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	1,2	2,4	0,428	< DL	< DL	0,056	< DL	< DL
TOC	$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	2	5	12,3	14,1	10,1	15,1	8,4	nd
Cl^-	$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	150	250	30,9	11,3	11,3	11,2	20	8,1
SO_4^{2-}	$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	250		793,9	135	220,8	472,5	832,3	469,7
NEL GC ($\text{C}_{10} - \text{C}_{40}$)	$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	0,25	0,5	0,41	0,14	0,24	0,2	0,29	0,18
NO_2^-	$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	0,4	0,5	nd	0,026	< DL	nd	0,037	nd
NO_3^-	$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	50		nd	2,8	6,0	nd	4,6	nd
F^-	$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	–		nd	0,137	0,139	nd	0,263	nd
PO_4^{3-}	$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	–		nd	< DL	0,22	nd	0,03	nd
pH	bezr.	–		nd	7	7,3	nd	7,2	nd
Vodivosť	$\text{mS} \cdot \text{m}^{-1}$	200	300	nd	90,7	92,1	nd	986,1	nd
CHSK_{Mn}	$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	5	10	nd	3,3	1,3	nd	1,6	nd
$\text{KNK}_{4,5}$	$\text{mmol} \cdot \text{l}^{-1}$	–		nd	8,1	6,8	nd	8,4	nd
$\text{ZNK}_{8,3}$	$\text{mmol} \cdot \text{l}^{-1}$	–		nd	1,31	0,37	nd	1,42	nd
Tvrdosť	$\text{mmol} \cdot \text{l}^{-1}$	–		nd	5,34	5,63	nd	11,24	nd
Ca^{2+}	$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	–		nd	136	122	nd	264	nd
Mg^{2+}	$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	–		nd	47,3	62,8	nd	113	nd
Na^+	$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	–		nd	13,8	6,81	nd	15,3	nd
K^+	$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	–		nd	3,3	2,5	nd	4,3	nd
SiO_2	$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	–		nd	71,28	78,12	nd	52,23	nd
Fe^{2+}	$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	–		nd	0,016	< DL	nd	0,537	nd
HCO_3^-	$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	–		nd	494,1	414,8	nd	512,4	nd

Poznámka: < DL – hodnota nižšia ako detekčný limit, nd – nestanovovaná hodnota, IT – intervenčné kritérium pre priemysel, parametre Fe, Mn, Al, NO_3^- a SO_4^{2-} – kritérium MH z NV č. 496/2010 Z. z.

Note: < DL – value below the detection limit, nd – not determined value, IT – intervention criterion for industry, parameters Fe, Mn, Al, NO_3^- and SO_4^{2-} – criterion of MH from NV No. 496/2010 Coll.

Ni ide o prekročenie limitnej hodnoty ($20 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$) vo vzorkách povrchovej vody z potoka Potkania debra (PD-3 a PD-5, $\text{Ni}_{\text{max}} = 107 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ vo vzorke PD-3). V prípade Hg sa stanovené hodnoty vo vzorkách povrchovej vody porovnávali s limitnou hodnotou nariadenia vlády č. 269/2010 Z. z. ($\text{NPK}_{\text{Hg}} = 0,07 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$), ku ktorej bola pripočítaná hodnota pozadovej koncentrácie v prislúchajúcom vodnom útvere povrchovej vody (SK B0094 Čičava = hodnota $0,5 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$). Výsledná hraničná hodnota Hg v povrchovej vode = $0,57 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$. Prekročenie takto stanovenej limitnej hodnoty Hg v povrchovej vode sa znamenalo len v priestore opusteného ložiska pri odbere vody z potoka Potkania debra v odberovom mieste PD-1 ($\text{Hg}_{\text{max}} = 0,7 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$).

Kontaminácia riečnych a dnových sedimentov

Obsah sledovaných prvkov vo vzorkách riečnych/dnových sedimentov (18 vzoriek) odobraných počas prieskumu EZ Merník bol zvýšený iba v prípade Hg a Ni. Pri ostatných stanovovaných parametroch neboli prekročené hodnoty ID ani IT v zeminách podľa smernice MŽP SR č. 1/2015-7 (Auxt et al., 2015). Pri obsahu Hg bola prekročená hodnota IT pre priemyselné zóny pri jednej vzorke (DSP-4 = $25,41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ suš.) a hodnota IT pre obytné zóny pri dvoch vzorkách (DSP-1 = $12,6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ suš., DSZ-2 = $6,29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ suš.). Keďže študované územie zaraďujeme medzi priemyselné oblasti, môžeme konštatovať, že hodnoty IT prekročila len jedna vzorka. Vo vzťahu ku geogénnej kontaminácii reprezentujú riečne/dnové sedimenty tohto územia typické substráty so zvýšeným obsahom sledovaných prvkov oproti ich priemernému obsahu v riečnych sedimentoch v rámci SR, ktoré odrážajú litologický charakter zdrojových hornín (Bodiš et al., 1999).

Kontaminácia pôd a zemín

Výsledky chemických analýz pevných substrátov pôdy a zemín z vrtov a kopaných sond (tab. 3 a 4) potvrdzujú zistenia z prieskumov realizovaných v minulosti (Hančulák et al., 2006; Daniel et al., 2003), ktoré opisujú prítomnosť anorganických kontaminantov v pôdach a zeminách v doline potoka Potkania debra. Zistenia v realizovanom prieskume odrážajú charakter kontaminácie viazanej na prítomnosť ťažobného odpadu v alúviu potoka Potkania debra, ako aj príľahlom alúviu potoka Čičava, ale dominantne predstavujú následky prirodzených procesov zvetrávania primárnej mineralizácie viazanej na ortuťové rudy v prípade kontaminantov Hg a Sb. V prípade Hg boli prekročené hodnoty intervenčného limitu pre priemyselné oblasti ($\text{IT}_{\text{Hg}} = 20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) len v dvoch prípadoch – vo vrtoch HGM-5 a HGM-6, ktoré sú situované v blízkosti najdôležitejších častí priestoru ťažobného a úpravnickeho podniku (odval pred štôľňou Mária a v priestore odvalu

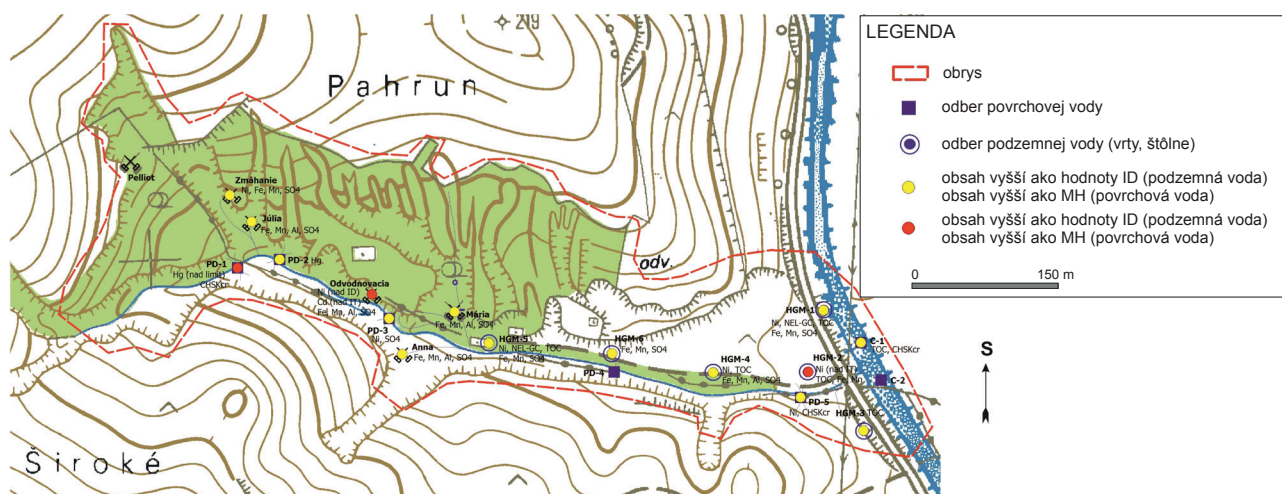
štôľne Anna; obr. 6). Na znečistení pevných substrátov pôdy a zemín ortuťou v pásme prevzdušnenia (hlbkový horizont $0 \sim 2 \text{ m}$) sa podieľajú aj úlety z pražiarne rúd v priestore bývalého banského závodu. Tento zdroj kontaminácie je zložitý doložiť exaktne, v každom prípade vplyv pražiarne Hg rúd je zrejмый aj v širšom okolí Merníka. Potvrdzujú to plošné mapy z *Geochemického atlasu SR*, časť *Pôdy* (Čurlík a Šefčík, 1999), ako aj regionálna štúdia Hančuláka et al. (2006).

V prípade zvýšenej koncentrácie Sb v zeminách v pásme prevzdušnenia (obr. 7) ide o zvetrávanie sekundárnej mineralizácie viazanej na samotné ložisko Hg, ktoré bolo predmetom dobývania a spracovania Hg rudy, ako aj procesy obohatenia zemín zo zvetrávania pevného skalného skeletu viazaného na bezprostredné geologické podložie zemín a pôd vyvinutých na sedimentoch paleogénu. Pri prekročení indikačného limitu Sb boli analyzované vzorky sústredené do haldoviny odvalov pred štôľňami Júlia, Mária a Odvodňovacia, ako aj na odval Pelliot, ktorý sa vyskytuje nad erozívnou ryhou celého dobývacieho priestoru (S-8, hĺbka odberu $3 - 4 \text{ m}$).

Špecifická situácia je v prípade prekročenia limitných hodnôt ID a IT niklu v pôdach a zeminách lokality EZ Merník. Z hľadiska interpretácie ide jednoznačne o geogénny pôvod zvýšeného obsahu Ni v pôdach, ktorý je daný zvetrávaním pevných substrátov zubereckého súvrstvia s prítomnosťou ultrabázických hornín. Zvetrávaním týchto sedimentov vznikajú tzv. serpentínické pôdy (Čurlík et al., 2011, 2015; Ďurža et al., 2012), pre ktoré je typický vysoký obsah Ni a Cr v širokej oblasti flyšového pásma s výskytom zubereckého súvrstvia a tzv. šambronskej zóny. Limitná hodnota IT bola prekročená ($\text{IT}_{\text{Ni}} = 500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) vo vrtoch HGM-5 a HGM-6, ktoré sú situované v blízkosti najdôležitejších častí priestoru ťažobného a úpravnickeho podniku – odval pred štôľňou Mária a v priestore odvalu štôľne Anna (vzorka S-12 s extrémnym obsahom $\text{Ni} = 1\,471 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) a vo vrte HGM-3.

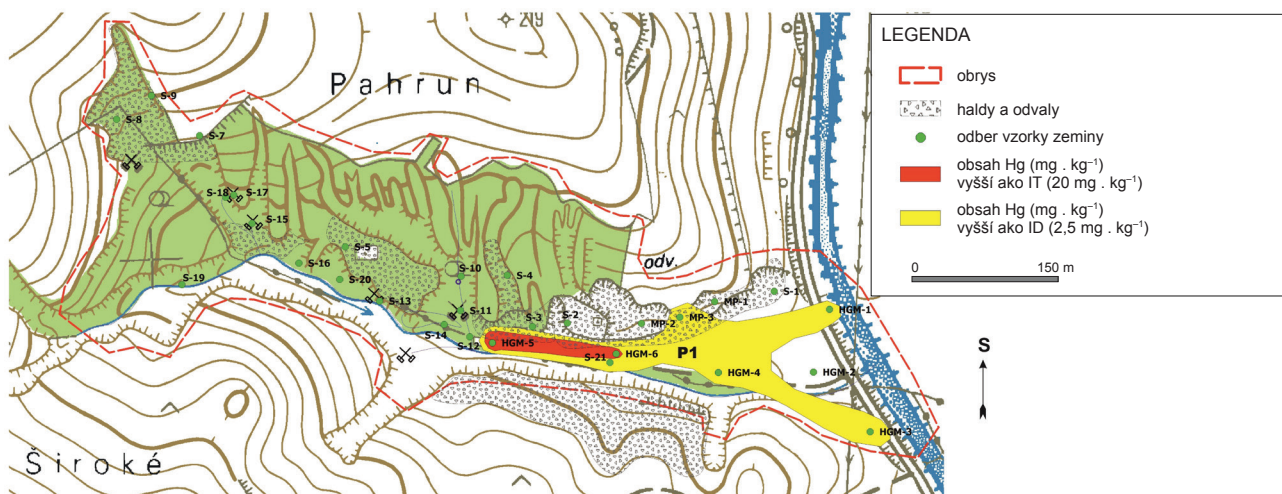
Záver

Geologický prieskum EZ Merník definoval povahu znečisťujúcich látok v území, kde ako rizikové prvky boli stanovené ortuť, antimón, nikel (geogénny pôvod) a látky typické pre banské lokality, Fe, Mn a sírany. Pri identifikácii zdrojov znečistenia na lokalite Merník je situácia komplikovaná vzhľadom na charakter študovaného územia a kombináciu procesov a činností vedúcich k vzniku tejto EZ. Kontaminácia pôdy (zemín v pásme prevzdušnenia) a zemín v pásme nasýtenia je výsledkom kombinácie procesov prirodzeného zvetrávania hornín s vyšším podielom minerálnych fáz obsahujúcich rizikové prvky (Hg a Sb) viazané na Hg mineralizáciu a zvetrávania hornín zubereckého súvrstvia s podielom ultrabázických hornín (zdroj Ni) v kombinácii s následkami banskej a úpravnickej čin-



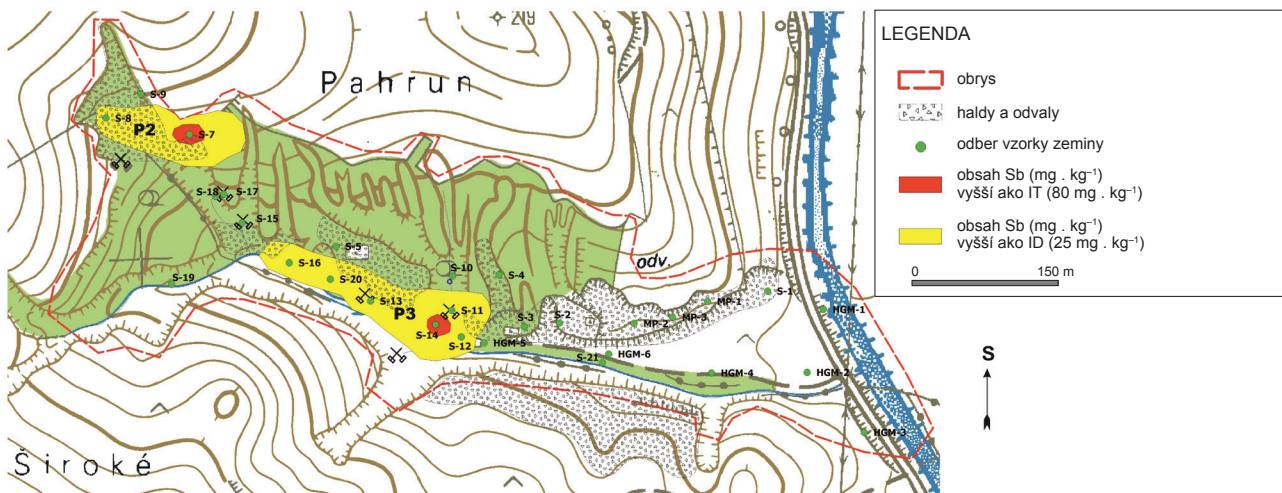
Obr. 5. Distribúcia nadlimitného obsahu kontaminantov v podzemnej vode lokality Merník.

Fig. 5. Distribution of exceeding values of contaminants in the groundwater in Merník locality.



Obr. 6. Distribúcia Hg v pôdach a zeminách v pásme prevzdušnenia na lokalite Merník.

Fig. 6. Distribution of Hg in soils (unsaturated zone) in the Merník locality.



Obr. 7. Distribúcia Sb v pôdach a zeminách v pásme prevzdušnenia na lokalite Merník.

Fig. 7. Distribution of Sb in soils (unsaturated zone) in the Merník locality.

Tab. 3

Obsah vybraných chemických prvkov (mg . kg⁻¹) vo vzorkách zemin z kopaných sond a vrtov v pásme prevzdušnenia.
Contents of selected elements (mg . kg⁻¹) in samples of soils from dug holes and boreholes (unsaturated zone).

Označenie vzorky	Charakteristika materiálu	Ortuť (Hg)	Nikel (Ni)	Antimón (Sb)
ID		2,5	180	25
IT (priemysel)		20	500	80
S-1 (0,0 – 1,0 m)	H	< DL	486,05	< DL
S-2 (0,0 – 4,0 m)	H	< DL	97,87	< DL
S-3 (0,0 – 1,0 m)	H	0,71	54,77	< DL
S-4 (0,0 – 4,0 m)	H	< DL	62,55	< DL
S-5 (0,0 – 4,0 m)	H	< DL	58,18	< DL
S-7 (0,0 – 1,0 m)	H	< DL	344,72	87,12
S-8 (3,0 – 4,0 m)	H	0,42	18,40	78,67
S-9 (1,0 – 4,0 m)	H	1,37	200,72	< DL
S-10 (0,0 – 2,0 m)	D	< DL	65,08	< DL
S-11 (1,0 – 2,0 m)	A _(štôľňa)	< DL	57,16	63,54
S-12 (1,2 – 2,0 m)	A _(štôľňa)	0,42	1 471,27	51,16
S-13 (1,5 – 2,0 m)	A _(štôľňa)	< DL	160,20	41,72
S-14 (1,0 – 2,0 m)	A _(štôľňa)	< DL	43,56	220,50
S-15 (1,0 – 1,5 m)	A _(štôľňa)	< DL	294,20	< DL
S-16 (1,6 – 2,0 m)	A	< DL	211,31	59,09
S-17 (1,0 – 2,0 m)	A _(štôľňa)	< DL	171,16	< DL
S-18 (1,0 – 2,0 m)	A _(štôľňa)	< DL	143,43	< DL
S-19 (0,5 – 1,0 m)	A	< DL	61,62	< DL
S-20 (0,8 – 1,7 m)	A	< DL	385,48	47,45
S-21 (0,0 – 2,0 m)	A	3,78	232,65	< DL
HGM-1 (0,8 – 0,9 m)	A	6,22	60,86	< DL
HGM-2 (0,6 – 0,7 m)	A	< DL	47,94	< DL
HGM-3 (0,9 – 1,0 m)	A	6,95	587,38	< DL
HGM-4 (0,8 – 0,9 m)	A	14,53	44,22	< DL
HGM-5 (0,5 – 0,6 m)	A	53,32	188,11	< DL
HGM-6 (1,2 – 1,3 m)	A	32,71	196,14	< DL
MP-1 (1,5 – 1,7 m)	H	ND	ND	< DL
MP-2 (0,8 – 1,2 m)	H	< DL	229,18	< DL
MP-3 (1,8 – 2,0 m)	H	12,52	91,35	< DL

Poznámka: < DL – hodnota nižšia ako detekčný limit, H – haldový materiál, A – aluviálne sedimenty, A_(štôľňa) – aluviálne sedimenty pred štôľňami, D – deluviálne sedimenty.

Note: < DL – value below the detection limit, H – dump material, A – alluvial sediments, A_(štôľňa) – alluvial sediments in front of adits, D – deluvial sediments.

Tab. 4

Obsah vybraných chemických prvkov (mg . kg⁻¹) vo vzorkách zemín z vrtov a kopaných sond v pásme nasýtenia.
Contents of selected elements (mg . kg⁻¹) in samples of soils from boreholes and dug holes (saturated zone).

Označenie vzorky	Charakteristika materiálu	Ortuť (Hg)	Nikel (Ni)	Kadmium (Cd)
ID		2,5	180	10
IT (priemysel)		20	500	30
S-1 (1,0 – 4,0 m)	H	3,16	515,69	< DL
S-2 (0,0 – 4,0 m)	H	< DL	97,87	nd
S-3 (1,0 – 4,0 m)	H	< DL	87,12	< DL
S-4 (0,0 – 4,0 m)	H	< DL	62,55	nd
S-5 (0,0 – 4,0 m)	H	< DL	58,18	nd
S-6 (3,0 – 4,0 m)	H	< DL	195,07	nd
S-7 (2,7 – 3,6 m)	H	2,28	225,47	1,14
S-8 (3,0 – 4,0 m)	H	0,42	18,40	nd
S-9 (1,0 – 4,0 m)	H	1,37	200,72	nd
HGM-1 (2,3 – 2,5 m)	A	< DL	54,15	7,00
HGM-2 (2,7 – 2,8 m)	A	< DL	119,46	5,44
HGM-3 (5,8 – 5,9 m)	A	1,09	337,47	nd
HGM-4 (4,1 – 4,2 m)	A	< DL	150,26	4,02
HGM-5 (2,6 – 2,8 m)	A	< DL	185,53	8,77
HGM-6 (3,5 – 3,6 m)	A	8,00	132,87	9,52
MP-1 (5,4 – 5,5 m)	H	< DL	102,63	nd
MP-3 (8,3 – 9,0 m)	Z	0,58	801,00	13,50

Poznámka: < DL – hodnota nižšia ako detekčný limit, nd – nestanovovaná hodnota, H – haldový materiál, A – aluviálne sedimenty, Z – zlepenec.

Note: < DL – value below the detection limit, nd – not determined value, H – dump material, A – alluvial sediments, Z – conglomerates.

nosti, ktorá vyprodukovala množstvo ťažobného odpadu s rôznym spôsobom nakladania (odvaly, haldy, výtoky zo štôlní).

Primárny zdroj znečistenia v celom území predstavujú banské haldy a odvaly a ich rozplavovanie a zvetrávanie, ktoré spôsobujú znečistenie pôdy/zemín a povrchovej vody. Vytiekajúca banská voda zo štôlní predstavuje sekundárny zdroj znečistenia povrchovej vody v západnej časti územia, ale vzhľadom na nízku výdatnosť všetkých monitorovaných štôlní nepredstavuje významné environmentálne riziko. Výsledky geochemického hodnotenia kontaminácie územia nepoukazujú na rozsiahlejšiu plošnú kontamináciu v priestore EZ a reprezentujú iba ojedinelé prekročenia hodnôt IT stanovených smernicou MŽP SR č. 1/2015-7 z 28. januára 2015 v zeminách a vodách. Výpočtom v rámci analýzy rizika na základe údajov získaných počas prieskumu EZ Merník (Auxt et al., 2015) sa na lokalite nepotvrdilo environmentálne riziko a v danej lokalite v súčasnosti nebola identifikovaná žiadna cieľová skupina príjemcov (pravidelných návštevníkov) rizík.

Pod'akovanie

Práca vznikla v rámci geologickej úlohy *Prieskum prioritných environmentálnych záťaží na vybraných lokalitách Košického a Prešovského kraja: Poproč – Petrova dolina, Smolník – ťažba pyritových rúd, Merník – ortuťové bane, časť 16*, ktorej objednávateľom bolo MŽP SR, a s podporou grantovej úlohy VEGA č. 1/0321/14.

Literatúra / References

- AUXT, A., KOTÚČ, J., BAČIK, M., LEŠŠO, J., ŠOTNÍK, P., JURKOVÍČ, L., PETKOVÁ, K., SEKULA, P., ml., KOMOŇ, J., POLČAN, I. a SEKULA, P., st., 2015: Prieskum environmentálnej záťaže VT (018)/Merník – ortuťové bane (SK/EZ/VT/1024). Záverečná správa geologickej úlohy. *Manuskript. Bratislava, archív MŽP SR, 80 s. (+ prílohy)*.
- BAČO, P., HRINKO, V., VARGA, M., VALKO, P., STUPÁK, J. a SELIGA, J., 1988: Merník – HG, záverečná správa úlohy, surovina:

- HG Rudy, VP, STAV k 31. 7. 1987. *Manuskript. Bratislava, archív Št. Geol. Úst. D. Štúra (a. č. 75 593), 280 príloh, 6 dielov.*
- BAJTOŠ, P., 2016: Mine waters in the Slovak part of the Western Carpathians: Distribution, classification and related environmental issues. *Slovak Geol. Mag.*, 16, 1 139 – 158.
- BAŇACKÝ, V., VASS, D., KALIČIAK, M., REMŠÍK, A. a POSPIŠIL, P., 1987: Vysvetlivky ku geologickej mape severnej časti Východoslovenskej nížiny 1 : 50 000. *Bratislava, Geol. Úst. D. Štúra, 117 s.*
- BODIŠ, D., RAPANT, S., KHUN, M., KLUKANOVÁ, A., LEXA, J., MACKOVÝCH, D., MARSINA, K., PRAMUKA, S. a VOZÁR, J., 1999: Geochemický atlas SR, časť VI: Riečne sedimenty. *Bratislava, Geologická služba Slovenskej republiky, 145 s.*
- ČURLÍK, J., ĎURŽA, O., JURKOVIČ, L., HODOSSYOVÁ, R. a KOLESÁR, M., 2011: Geogénna kontaminácia chrómom a niklom a „serpentinické“ pôdy v oblasti centrálneokarpatskej paleogénnej panvy východného Slovenska. *Miner. Slov.*, 43, 4, 365 – 376.
- ČURLÍK, J., KOLESÁR, M., ĎURŽA, O. a HILLER, E., 2016: Dandelion (*Taraxacum officinale*) and Agrimony (*Agrimonia eupatoria*) as indicators of geogenic contamination of flysch soils in Eastern Slovakia. *Arch. Environ. Contamin. Toxicol.*, 70, 3, 475 – 486.
- ČURLÍK, J. a ŠEFČÍK, P., 1999: Geochemický atlas Slovenskej republiky. Časť V: Pôdy. *Bratislava, Ministerstvo živ. prostr. SR a Výsk. úst. pôdoznavectva a ochrany pôdy, 99 s.*
- DADOVÁ, J., ANDRÁŠ, P., KUPKA, J., KRŇÁČ, J., ANDRÁŠ, P., Jr., HRONCOVÁ, E. a MIDULA, P., 2016: Mercury contamination from historical mining territory at Malachov Hg-deposit (Central Slovakia). *Environ. Sci. Pollution Res.*, 23, 3, 2 914 – 2 927.
- DANIEL, J., BEZÁK, J., MATÚŠ, J., LUČIVJANSKÝ, L., MAŠLÁROVÁ, I. a DANIELOVÁ, K., 2003: Komplexné zhodnotenie zatvoreného ložiska Merník. Záverečná správa geologickej úlohy. *Manuskript. Spišská Nová Ves, archív Uranpres, 197 s.*
- ĎUĐA, R. a KALIČIAKOVÁ, E., 1987: Mineralogicko-paragenetické pomery na Hg ložisku Merník. *Miner. slov.*, 19, 5, 423 – 442.
- ĎURŽA, O., ČURLÍK, J., KOLESÁR, M. a MILIČKA, J., 2012: Geochemicky anomálne hodnoty chrómu a niklu v pôdach a ich prenos do asimilačných orgánov rastlín v oblasti východoslovenského flyša. *Acta Environ. Univ. Comen.*, 20, 2, 25 – 31.
- GROSS, P., KÖHLER, E. a SAMUEL, O., 1984: Nové litostratigrafické členenie vnútrokarpatského paleogénu. *Geol. Práce, Spr.*, 81, 103 – 118.
- HANČULÁK, J., BOBRO, M., ŠESTINOVÁ, O., BREHUV, J. a SLANČO, P., 2006: Ortuť v prostredí starých banských záťaží Rudnianska a Merníka. *Acta Montan. Slov.*, 11, 2, 295 – 299.
- ILAVSKÝ, J. a SATRAN, V., 1980: Metallogenic map of Czechoslovakia 1 : 500 000. Explanatory text and legend. *Bratislava, Geol. Úst. D. Štúra, 144 s.*
- KOLESÁR, M., 2015: Biogeochemické aspekty transferu prvkov v geogénne kontaminovaných pôdach flyšovej oblasti severovýchodného Slovenska. Dizertačná práca. *Manuskript. Bratislava, archív Kat. geochém. PriF UK, 111 s.*
- Nariadenie vlády Slovenskej republiky č. 282/2010 Z. z., ktorým sa ustanovujú prahové hodnoty a zoznam útvarov podzemných vôd.
- Nariadenie vlády Slovenskej republiky č. 269/2010 Z. z., ktorým sa ustanovujú požiadavky na dosiahnutie dobrého stavu vôd.
- Nariadenie vlády Slovenskej republiky č. 496/2010 Z. z., ktorým sa mení a dopĺňa nariadenie vlády Slovenskej republiky č. 354/2006 Z. z., ktorým sa ustanovujú požiadavky na vodu určenú na ľudskú spotrebu a kontrolu kvality vody určenej na ľudskú spotrebu.
- Smernica Ministerstva životného prostredia SR č. 1/2015-7 z 28. januára 2015 na vypracovanie analýzy rizika znečisteného územia. *Bratislava, Ministerstvo život. prostr. SR, 96 s.*
- VASS, D., VOZÁR, J., ELEČKO, M., ČVERČKO, M., KALIČIAK, M. a MORKOVSKÝ, M., 1987: Odkrytá mapa Východoslovenskej nížiny 1 : 100 000 a vysvetlivky. Čiastková záverečná správa. Názov štátnej úlohy: Regionálny geologický výskum SSR, III. etapa; Názov čiastkovej úlohy: Základné geologické mapy topografických listov 1 : 25 000 a základné geologické mapy regiónov 1 : 50 000, doba riešenia: 1986 – 1987. *Manuskript. Bratislava, archív Geol. Úst. D. Štúra, 87 s.*
- VRANA, K., KOTÚČ, J., LEŠO, J., BAČIK, M., KOMOŇ, J., AUXT, A. a POLČAN, I., 2014: Projekt geologickej úlohy – Prieskum environmentálnej záťaže (VT (018)/Merník – ortuťové bane, SK/EZ/VT/1024). *Manuskript. Bratislava, archív MŽP SR, 135 s.*
- ŽENIŠOVÁ, Z., FLAKOVÁ, R., JAŠOVÁ, I. a CICMANOVÁ, S., 2009: Antimón a arzén vo vodách ovplyvnených banskou činnosťou vo vybraných oblastiach Slovenska. *Podzemná voda*, 15, 100 – 117.
- ŽENIŠOVÁ, Ž., FLAKOVÁ, R., KRČMÁŘ, D., ONDREJKOVÁ, I. a BAJTOŠ, P., 2015: Kontaminácia vôd v oblastiach opustených antimónových ložísk Slovenska. *Bratislava, Slov. asoc. hydrogeológov, 173 s.*

Geochemical evaluation of environmental risks in locality of abandoned Hg-deposit Merník (Eastern Slovakia)

The environmental burden in locality “Merník – Hg mines” is a consequence of the long term mining and processing of mercury ores. Geological survey in this locality has defined the nature of pollutants, which include inorganic substances – the risk elements as mercury, antimony, nickel and typical materials for mine sites where the values of Fe, Mn, and sulphates, exceeding limits were determined. High level of nickel in environmental substrates is typically a consequence of geogenic contamination with wider regional character (Čurlík et al., 2011, 2015; Ďurža et al., 2012). In the past, a huge amount of mercury has been released to the environment from the former Hg ore processing plant as the emissions into the air. In the studied area heaps and impoundments washed by water and weathering processes represent the primary pollution source causing soil and surface water contamination. Leaking water from the mine adits represents a secondary source of pollution of surface waters in the western segment of the area, but due to the low water outflow from all monitored adits, mine water does not pose a significant risk. The results of the geochemical assessment of contaminated sites do not point to extensive contamination in the area of environmental burden Merník and represent only isolated exceeding of IT limits stated by the Ministry of Environment of the Slovak Republic Directive No. 1/2015-7 of 28 January 2015 for soils and waters.

Soil contamination is the result of combination of natural weathering of rocks with a high value of the mineral phases containing hazardous components (Hg and Sb) linked to the Hg-mineralization and weathering of rocks with a presence of ultramafic rocks (source of Ni) in combination with the effects of mining and mineral processing

operations (mining wastes and outflows of mine waters). Weathering of rocks and sediments in a wide area of flysch zone with the occurrence of ultramafic pebbles in conglomerates of the Zuberec Formation and Šambron's zone developed “serpentine”-like soils, which are characterized by a high level of Ni and Cr (Čurlík et al., 2011, 2015). Maximum concentrations of Ni in the soils in studied locality were determined in the area of Mária and Anna adits (sample S-12 with extreme level of Ni = 1 471 mg · kg⁻¹).

In majority of water samples the values of hazardous contaminants (Hg, Sb, As) were below the detection limit of analytical methods. Increased content of Ni in the groundwater is produced by the water circulation through the rocks with elevated amounts of Ni (Zuberec Formation). Exceeding ID levels were recorded for Ni in the groundwater of the boreholes HGM-1 = 101 µg · l⁻¹, HGM-4 = 169.7 µg · l⁻¹, resp. HGM-5 = 121 µg · l⁻¹, exceeding the IT_{Ni} level reached the maximum value of 344 µg · l⁻¹ Ni in the groundwater sample from the borehole HGM-2.

According to Annex No.1 of Government Regulation No. 496/2010, in the case of water outflow from the mine adits at the Merník site, the parameters of Fe_{total}, Mn and sulphates have exceeded the limits. The average content of sulphates was ~ 604 mg · l⁻¹, concentrations of Fe 10 times exceeded the limit value with the maximum, found in the outflow from the Júlia adit (Fe = 20.2 mg · l⁻¹) with negligible flow of 0.014 l · s⁻¹.

Doručené / Received: 10. 10. 2016

Prijaté na publikovanie / Accepted: 15. 12. 2016

Hodnotenie využiteľnosti výhradných ložísk nerastných surovín aplikáciou analýzy SWOT

PETER BALÁŽ^{1,2}

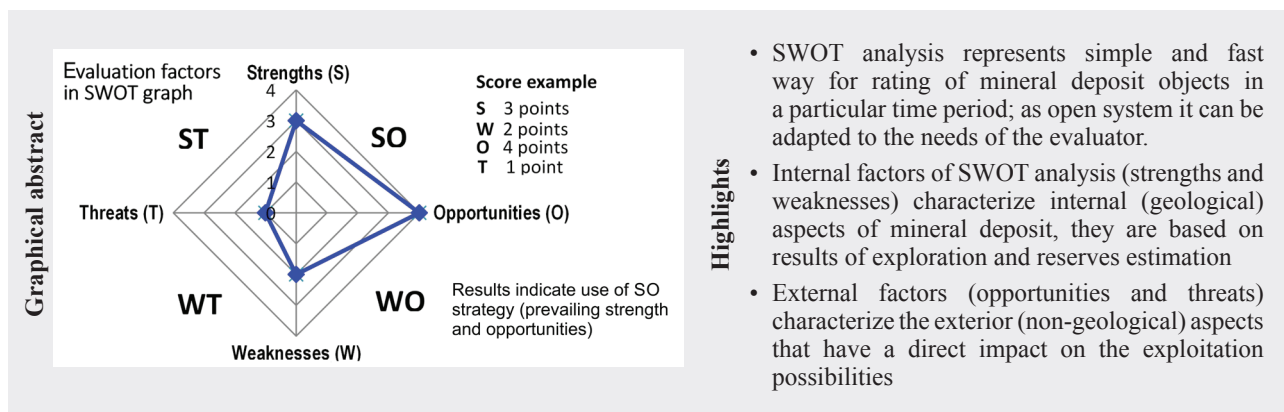
¹Interoceanmetal Joint Organization, Szczecin, Poland

²Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, Mlynská dolina 1, 817 04 Bratislava, Slovensko

Evaluation of reserved mineral deposits usability applying a SWOT analysis

Abstract: Article discusses an application of SWOT analysis for determination of mineral deposit feasibility for exploitation. SWOT internal and external parameters were customized to meet special conditions and specificity connected with assessment of mineral deposit projects. Analysis takes into account geological, technical, economic, environmental and legislative aspects of the project, which are unique for particular evaluated mineral deposit. System is adjusted for Slovak legal conditions, having regard to the reserves categorization, mineral wealth protection and conflicts of interests.

Key words: SWOT analysis, mineral deposit, raw materials



ÚVOD

Analýza SWOT je jedným z nástrojov strategického manažmentu, ktorého cieľom je identifikovať silné a slabé stránky, ako aj príležitosti a ohrozenia konkrétneho projektu. Využíva sa hlavne v ekonomickej sfére na rýchle spracovanie prehľadu strategickú situáciu hodnoteného podniku (Sakál et al., 2007). Vypracovaním metodiky sa v rokoch 1960 až 1970 zaoberal Stanford Research Institute pri analýze plánovacích procesov firiem (Rothwell, 2010). K rozvoju analýzy postupne prispieval celý rad ďalších autorov a inštitúcií. V rámci riešenia geologickej úlohy *Surovinový potenciál Slovenskej republiky – analýza vybraných nerastných surovín* (Baláž et al., 2015) bola navrhnutá úprava systému analýzy SWOT na podmienky a formu vyhovujúcu hodnoteniu ložísk nerastných surovín. Uvedená upravená metodika je základom tohto príspevku, ktorý má za cieľ jej podrobnejšie vysvetlenie, úpravu

a doplnenie. Analýza je určená na hodnotenie výhradných ložísk v legislatívnych podmienkach Slovenskej republiky (kategorizácia zásob, inštitúty ochrany nerastného bohatstva, hodnotenie konfliktov záujmov).

PRINCÍP ANALÝZY SWOT

Analýza SWOT predstavuje identifikáciu silných stránok (*S – strengths*), slabých stránok (*W – weaknesses*), príležitostí (*O – opportunities*) a ohrození (*T – threats*). Silné a slabé stránky predstavujú vnútorné faktory (vnútornú analýzu), príležitosti a ohrozenia predstavujú externé faktory (externú analýzu). Základným prvkom analýzy SWOT je identifikácia týchto faktorov a následné zhodnotenie (tab. 1). Výber externých a interných faktorov bol prispôbený hodnoteniu ložísk nerastných surovín. Súčasťou analýzy je bodovací systém jednotlivých faktorov matice SWOT s výsledným hodnotením.

Tab. 1
Schéma (matica) analýzy SWOT.
Diagram (matrix) of the SWOT analysis.

Interné faktory	S silné stránky	W slabé stránky
Externé faktory	O príležitosti	T ohrozenia

Identifikácia faktorov na hodnotenie výhradného ložiska nerastnej suroviny

Faktory (parametre) boli vybrané tak, aby v maximálnej miere obsiahli skutočnosti ovplyvňujúce reálne využitie ložiska nerastnej suroviny. Zároveň sú uvedené potenciálne zdroje, z ktorých je možné čerpať relevantné informácie o danom parametri hodnotenia.

Tab. 2
Veľkosť ložiska podľa druhu suroviny (na základe množstva geologických zásob).
Deposit size according to the type of mineral (based on geological reserves).

Rudy (obsah kovu)	M. j.	Ložiskový výskyt	Malé ložisko	Stredné ložisko	Veľké ložisko
Au	t	< 1	1 – 10	10 – 100	> 100
Ag	t	< 50	50 – 500	500 – 5 000	> 5 000
Cu, Pb, Zn	kt	< 10	10 – 100	100 – 1 000	> 1 000
Sb, Sn, W, Mo, Hg	kt	< 1	1 – 10	10 – 100	> 100
Ni	kt	< 5	5 – 50	50 – 500	> 500
Fe, Mn	kt	< 1 000	1 000 – 10 000	10 000 – 100 000	> 100 000
Vzácne zeminy	t	< 1 000	1 000 – 20 000	20 000 – 100 000	> 100 000

Nerudy	M. j.	Ložiskový výskyt	Malé ložisko	Stredné ložisko	Veľké ložisko
Íly	kt	< 100	100 – 1 000	1 000 – 5 000	> 5 000
Azbest	mil. t	< 6	6 – 20	20 – 50	> 50
Kaolín	kt	< 500	500 – 3 000	3 000 – 5 000	> 5 000
Bentonit	kt	< 500	500 – 5 000	5 000 – 20 000	> 20 000
Kremenec	kt	< 200	200 – 1 000	1 000 – 5 000	> 5 000
Kremenné piesky	kt	< 500	500 – 5 000	5 000 – 50 000	> 50 000
Kremeň	kt	< 10	10 – 100	100 – 1 000	> 1 000
Vápence a dolomity	mil. t	< 10	10 – 30	30 – 100	> 100
Sialitické suroviny	mil. t	< 10	10 – 100	100 – 500	> 500
Sadrovec	mil. t	< 15	15 – 50	50 – 100	> 100
Perlit	kt	< 300	300 – 3 000	3 000 – 10 000	> 10 000
Sľuda	mil. t	< 1	1 – 5	5 – 10	> 10
Tavný čadič	mil. t	< 1	1 – 5	5 – 10	> 10
Dekoračný kameň	m ³	< 100 000	100 000 – 500 000	500 000 – 5 000 000	> 5 000 000
Diatomit	kt	< 200	200 – 2 000	2 000 – 5 000	> 5 000
Grafit	kt	< 200	200 – 500	500 – 1 000	> 1 000
Barit	kt	< 250	250 – 2 000	2 000 – 5 000	> 5 000
Kamenná soľ	mil. t	< 5	5 – 50	50 – 100	> 100
Zeolit	mil. t	< 1	1 – 10	10 – 100	> 100
Mastenec	kt	< 200	200 – 2 000	2 000 – 10 000	> 10 000
Magnezit	mil. t	< 2	2 – 10	10 – 100	> 100
Pýrit	mil. t	< 1	1 – 10	10 – 20	> 20
Spekularit	kt	< 100	100 – 500	500 – 1 000	> 1 000
Živce	kt	< 500	500 – 3 000	3 000 – 10 000	> 10 000
Stavebný kameň, štrkopiesky, tehliarske suroviny	mil. m ³	< 1	1 – 5	5 – 10	> 10

Interné faktory (silné a slabé stránky)

Charakterizujú interné (geologické) aspekty ložiska na základe výsledkov geologického prieskumu a výpočtu zásob. Patria k nim: množstvo zásob, kategória preskúmanosti zásob, kvalita a technologické vlastnosti suroviny, uloženie a realizovateľný spôsob otvárkovej ložiska vzhľadom na geologickú stavbu, banskotechnické podmienky ložiska.

Množstvo zásob

Je to ekonomický parameter ovplyvňujúci perspektívnosť projektu z hľadiska návratnosti investícií. Banské podnikanie predstavuje vo väčšine prípadov dlhodobé projekty spojené s vyšším investičným rizikom. Dostatočné množstvo vyťažiteľných zásob je jedným zo základných predpokladov úspešnej realizácie projektu. Na hodnotenie je možné použiť rozdelenie ložísk na veľkostné kategórie (tab. 2). Do hodnotenia vstupujú geologické zásoby vypočítané podľa podmienok využiteľnosti zásob alebo variantne, klasifikované podľa platnej klasifikácie (vyhláška SGÚ č. 6/1992 Zb.) a schválené komisiou pre klasifikáciu zásob ložísk nerastných surovín (MŽP SR). Kvôli vyššej presnosti hodnotenia je možné použiť odhad množstva vyťažiteľných zásob, pokiaľ sú dostupné parametre na ich výpočet (znečistenie, výrubnosť). Zdrojom informácií sú záverečné správy z ložiskového geologického prieskumu s výpočtom zásob, rozhodnutia o schválení zásob, resp. bilancie zásob výhradných ložísk SR.

Kategória preskúmanosti zásob

Predstavuje presnosť výpočtu zásob, čo podstatne ovplyvňuje mieru istoty ekonomického hodnotenia projektu. V podmienkach Slovenskej republiky klasifikáciu zásob výhradných ložísk SR upravuje zákon č. 44/1988 Zb. a vyhláška SGÚ č. 6/1992 Zb. Zásoby výhradného ložiska podľa stupňa jeho preskúmanosti alebo jeho časti a podľa stupňa znalosti jeho ťažných pomerov, kvality, technologických vlastností a banskotechnických podmienok sa klasifikujú na kategórie:

- Z-1 (overené zásoby),
- Z-2 (pravdepodobné zásoby),
- Z-3 (predpokladané zásoby).

Pri výpočte zásob v kategórii Z-1 sa chyba odhadu pohybuje v rozmedzí 5 – 10 %, pri Z-2 je to 10 – 40 %, pri zásobách kategórie Z-3 v rozmedzí 40 – 60 %. Zdrojom informácií sú záverečné správy z ložiskového geologického prieskumu s výpočtom zásob, rozhodnutia o schválení zásob, resp. bilancie zásob výhradných ložísk SR.

Kvalita a technologické vlastnosti suroviny

Kvalita suroviny významne ovplyvňuje dôležitý ekonomický parameter v procese oceňovania ložiska – úžitkovú hodnotu 1 t suroviny. Zároveň sa hodnotí vhodnosť suroviny na ďalšie technologické spracovanie. Spôsoby úpravy jednotlivých typov nerastných surovín sú všeobecne známe, v niektorých prípadoch však môžu byť úžitkové prvky chemicky viazané v surovine takým spôsobom, ktorý si vyžaduje špecifické technologické postupy. Z ekonomického hľadiska to predstavuje zvýšené investičné a prevádzkové náklady a projekt tak nemusí byť konkurencieschopný. Zdrojom informácií sú záverečné správy z ložiskového geologického prieskumu s výpočtom zásob a rozhodnutia o schválení zásob.

Uloženie a spôsob otvárkovej ložiska

Geologická pozícia ložiska a parametre jeho uloženia sú určujúcim faktorom spôsobu jeho otvárkovej a sprístupnenia zásob, a teda určujúcim faktorom nákladových položiek. Ložiská ťažiteľné povrchovým spôsobom vyžadujú niekoľkonásobne menšie investičné a prevádzkové náklady oproti hlbinné ťaženým ložiskám. Ložisko sa môže exploatovať aj kombinovaným spôsobom. Parameter má v hodnotení SWOT význam najmä pri ložiskových objektoch, ktoré sa nevyužívajú, resp. neboli ekonomicky hodnotené. Zdrojom informácií sú záverečné správy z ložiskového geologického prieskumu s výpočtom zásob.

Banskotechnické podmienky

Geologické a banskotechnické podmienky určujú prístupnosť a dobývateľnosť zásob. V závislosti od konkrétnej situácie (hydrogeologické pomery, inžiniersko-geologické pomery, tektonické pomery, hĺbka uloženia a pod.) môžu byť banskotechnické podmienky jednoduché až zložité, a to tak pri hlbinnom, ako aj pri povrchovom spôsobe ťažby. Zdrojom informácií sú záverečné správy z ložiskového geologického prieskumu s výpočtom zásob.

Externé faktory (príležitosti a ohrozenia)

Charakterizujú vonkajšie (negeologické) aspekty, ktoré majú priamy vplyv na možnosti využitia ložiska: legislatívny status (vrátane konfliktov záujmov), aktuálny stav sprístupnenia zásob a infraštruktúra na ložisku, odhad ekonomickej efektivity, dopyt po surovine a posúdenie vplyvov na životné prostredie.

Legislatívny status

Proces prebiehajúci od prieskumu ložiska až po ťažbu je v rámci banskogeologickej legislatívy Slovenskej re-

publiky podmienený splnením celého radu administratívnych podmienok, vypracovaním relevantných odborných plánov a štúdií a vyriešením konfliktov záujmov. Identifikácia konfliktov záujmov si vyžaduje konfrontáciu projektového zámeru s celou škálou záujmov chránených podľa osobitných predpisov (napr. vodný zákon, zákon o štátnej pamiatkovej starostlivosti, zákon o obecnom zriadení, zákon o ochrane poľnohospodárskeho pôdneho fondu, zákon o zdravotnej starostlivosti, zákon o ochrane prírody a krajiny, zákon o posudzovaní vplyvov na životné prostredie, zákon o dráhach, živnostenský zákon, zákon o telekomunikáciách a iné). Mimoriadne dôležitá je identifikácia vlastníckych a iných práv k pozemkom, resp. vyriešenie prístupu na pozemky. Splnenie týchto podmienok je nevyhnutné na povolenie banskej činnosti orgánom štátnej banskej správy. Samotná existencia chráneného ložiskového územia (CHLÚ), resp. dobývacieho priestoru (DP) nie je zárukou povolenia banskej činnosti, nepredstavuje teda rozhodujúci prvok pri hodnotení legislatívneho statusu. Zdrojom informácií sú rozhodnutia obvodných banských úradov o povolení banskej činnosti a určení DP, resp. CHLÚ.

Aktuálny stav sprístupnenia zásob a infraštruktúra

Parameter má v hodnotení SWOT význam najmä pri ložiskových objektoch, ktoré sa nevyužívajú, resp. neboli ekonomicky hodnotené. Existencia banských diel a historickej alebo aktuálnej ťažby zároveň znamená predpoklad čiastočne alebo úplne vybudovanej infraštruktúry na ťažbu, úpravu a dopravu suroviny. Z hľadiska nákladových položiek projektu majú ložiská sprístupnené banskými dielami z prieskumu, historickej alebo súčasnej ťažby významnú komparatívnu výhodu oproti neotvoreným ložiskám. Zdrojom informácií sú záverečné správy z ložiskového geologického prieskumu s výpočtom zásob, záverečné správy o komplexnom hodnotení ložísk nerastných surovín (Geofond), historické správy (Štátny ústredný banský archív), rozhodnutia o schválení zásob (MŽP SR) a pod.

Ekonomická efektívnosť

Ekonomické hodnotenie sa spravidla vypracúva v rámci štúdií využiteľnosti v rôznych štádiách projektu (*Preliminary Economic Assessment, Pre-Feasibility Study, Feasibility Study*). V minulosti sa vykonávali samostatné technicko-ekonomické štúdie (TEŠ), ktoré boli obdobou súčasných štúdií využiteľnosti, alebo bolo základné ekonomické hodnotenie súčasťou záverečných správ s výpočtom zásob. Pre systém hodnotenia SWOT je podstatná aktuálnosť hodnotenia, keďže staršie štúdie nereflektujú aktuálne ekonomické podmienky. Zdrojom informácií sú publikované technicko-ekonomické štúdie alebo technické správy (*Technical Reports*) k štúdiám využiteľnosti.

Dopyt po surovine

Realizácia projektu ťažby má zmysel len v prípade záujmu o danú nerastnú surovinu na trhu. Na tento účel sa vypracúvajú analýzy trhu, resp. marketingové štúdie. Pri základnej analýze SWOT spravidla nie sú takéto komplexné štúdie k dispozícii, vychádza sa preto zo známych skutočností – zahraničný obchod s danou surovinou, aktuálny trend cien nerastných surovín, existencia vládnych a európskych dokumentov definujúcich strategické a kritické suroviny pre SR, resp. EÚ. Zdrojom informácií sú publikované dokumenty (surovinová politika štátu, kritické nerastné suroviny pre EÚ a iné), štatistiky zahraničného obchodu a cien (ročenky, internet).

Posúdenie vplyvov na životné prostredie (proces EIA)

Aj keď je posúdenie vplyvov na životné prostredie (podľa zákona č. 24/2006) len jedným z konfliktov záujmov, ktoré musí záujemca o ťažbu vyriešiť, predstavuje samostatný proces, ktorého výsledok má rozhodujúci vplyv na realizovateľnosť projektu. Preto je vyčlenené ako samostatný externý faktor hodnotenia. V súčasných podmienkach sa vypracovanie štúdie často vyžaduje už v počiatočných štádiách banského projektu, ešte pred určením dobývacieho priestoru. Vypracovanie posúdenia vplyvov má však logický význam najmä pri konaní o získaní povolenia na banskú činnosť, ktoré je posledným administratívnym úkonom pred ťažbou a ktoré zahŕňa schvaľovanie plánu otvarky, prípravy a dobývania. Po predložení zámeru sa v rámci zisťovacieho konania rozhodne, či navrhovaná činnosť (ťažba nerastov) podlieha posudzovaniu vplyvov na životné prostredie (napr. aj na základe porovnania výšky plánovanej ročnej ťažby s prahovou hodnotou, stanovenou v uvedenom zákone). Zdrojom informácií sú rozhodnutia zo zisťovacích konaní a záverečné stanoviská k navrhovanej činnosti.

Systém hodnotenia

Reálne zhodnotenie každého faktora (parametra) určuje, či ide o silnú alebo slabú stránku (interné parametre), resp. príležitosť či hrozbu (externé parametre) hodnoteného projektu. Parametre sa v čase môžu meniť, aj keď väčšina interných parametrov (zásoby, kvalita suroviny, banskotechnické pomery) predstavuje relatívne stabilné vstupné položky (Baláž et al., 2015). Hodnotenie sa teda musí vzťahovať na konkrétne časové obdobie.

Systém hodnotenia je jednoduchý, každému parametru zodpovedá v hodnotení 1 bod, ktorý sa priraduje v rámci hodnotenia k silným alebo slabým stránkam (interné parametre), resp. k príležitostiam alebo ohrozeniam (externé parametre). Model sa dá použiť aj v prípade, ak nemáme

Tab. 3

Matica analýzy SWOT s definovaním hodnotiacich parametrov.
SWOT matrix – defining the evaluation criteria.

Interné faktory	
S (silné stránky)	W (slabé stránky)
<i>Množstvo zásob</i>	
zásoby zodpovedajúce min. kategórii malého ložiska	zásoby zodpovedajúce kategórii ložiskového výskytu
<i>Kategória preskúmanosti zásob</i>	
zásoby kategórie Z-1 a Z-2	zásoby kategórie Z-3
<i>Kvalita a technologické vlastnosti suroviny</i>	
vhodné na spracovanie a využitie suroviny	obmedzená vhodnosť na spracovanie a využitie suroviny
<i>Uloženie a spôsob otvárky ložiska</i>	
povrchové ložisko – lom	hlbinné ložisko – podzemná baňa alebo kombinovaný spôsob
<i>Banskotechnické podmienky</i>	
jednoduché banskotechnické podmienky	zložité banskotechnické podmienky
Externé faktory	
O (príležitosti)	T (ohrozenia)
<i>Legislatívny status</i>	
ťažné ložisko alebo povolená banská činnosť (vyriešené konflikty záujmov)	nepovolená banská činnosť (nevyliešené konflikty záujmov)
<i>Aktuálny stav sprístupnenia zásob a infraštruktúra</i>	
ťažné ložisko alebo otvorené ložisko, vybudovaná infraštruktúra na ťažbu, úpravu a dopravu	neotvorené ložisko, žiadna alebo nedostatočne vybudovaná infraštruktúra
<i>Ekonomická efektivita</i>	
ťažné ložisko alebo ekonomická efektivita preukázaná štúdiou (PEA, PFS, FS)	ekonomicky nehodnotené alebo ekonomická neefektivita preukázaná štúdiou (PEA, PFS, FS)
<i>Dopyt po surovine</i>	
ťažné ložisko alebo existuje dopyt na trhu, resp. deklarovaný hospodársky význam	nie je dopyt na trhu alebo deklarovaný hospodársky význam
<i>Posúdenie vplyvov na životné prostredie (proces EIA)</i>	
ťažné ložisko alebo kladné záverečné stanovisko posudzovania vplyvov na ŽP alebo navrhovaná činnosť nepodlieha posudzovaniu	záporné záverečné stanovisko posudzovania vplyvov na ŽP alebo navrhovaná činnosť nebola posudzovaná

k dispozícii informácie o všetkých parametroch. V takom prípade sa za parameter, ku ktorému nemáme zodpovedajúce informácie, pripočítava bod k slabým stránkam, resp. ohrozeniam.

V prezentovanom modeli sa parametrom nepriraduje rozdielna váha, keďže každý parameter potenciálne predstavuje rozhodujúci prvok hodnotenia. Vypracovanie modelu s pridelovaním rôznej váhy jednotlivým parametrom môže prispieť k reálnejšiemu hodnoteniu ložiskového objektu, vyžaduje si však vypracovanie vyváženého a funkčného bodovacieho systému, pretože nie každý parameter poskytuje rovnaké a jednoznačne identifikovateľné možnosti bodovania.

Tab. 4
Bodové hodnotenie.
Scoring.

Interné faktory (IF)		Body IF
S (silné stránky)	W (slabé stránky)	IF = a – b
a	b	
Externé faktory (EF)		Body EF
O (príležitosti)	T (ohrozenia)	EF = c – d
c	d	
Celkové hodnotenie		IF + EF

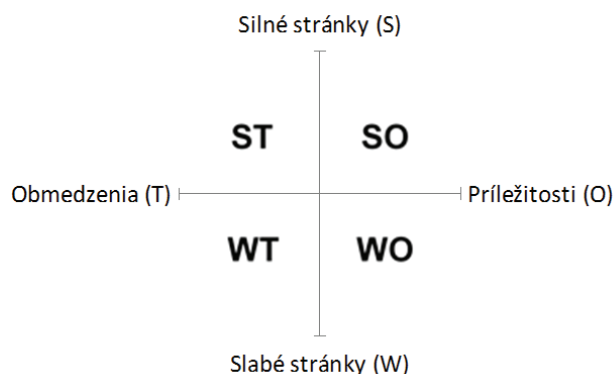
Schéma navrhovaného bodovania je v tab. 3 a 4. V prezentovanom modeli je rozsah dosiahnuteľných bodov v rozmedzí -10 až +10, reálne dosiahnuteľné hodnoty pri danom počte hodnotiacich parametrov sú 10, 8, 6, 4, 2, 0, -2, -4, -6, -8 a -10. V prípade zmeny počtu hodnotiacich parametrov užívateľom je potrebné následne upraviť aj systém bodovania tak, aby vyhovoval účelu hodnotenia.

Návrh hodnotenia:

- 10 až 4 – perspektívne ložisko, resp. potenciálne perspektívne ložisko,
- 2 až -2 – ložisko s neurčitou perspektívou využívania,
- 4 až -10 – neperspektívne ložisko, resp. nie je dostatok relevantných informácií na hodnotenie.

Stratégia SWOT

Analýzu SWOT je možné využiť na hodnotenie situácie a odhadovanie vhodnej stratégie využitia. Na to je možné použiť modelovanie zmeny vstupných faktorov. Je potrebné si uvedomiť, že v prípade ložísk nerastných surovín sú interné parametre dané geologickou situáciou, teda relatívne dlhodobo nemenné (môže sa meniť stupeň poznania a tým kategorizácia niektorých parametrov). Externé parametre sa v porovnaní s internými v tomto zmysle môžu meniť relatívne rýchlo. V matici SWOT existujú štyri strategické varianty (kvadranty) (obr. 1) – ST, SO, WT a WO. Tie určujú vhodnú stratégiu, aplikovateľnú na konkrétnu situáciu.



Obr. 1. Strategické kvadranty v matici SWOT.
Fig. 1. Strategy quadrants in the SWOT matrix.

Stratégia WT (prevládajúce slabé stránky a ohrozenia) je zameraná na minimalizáciu slabostí a hrozieb. V prípade ložísk nerastných surovín je potrebné zamerať sa na zvýšenie stupňa preskúmanosti zásob a banskotechnických podmienok (interné parametre) a následne na možnosti zlepšenia v rámci externých parametrov. Spravidla ide o nevyužívané ložisko s nízkym stupňom preskúma-

nosti, nedostatkom relevantných informácií na hodnotenie a neurčitou perspektívou využívania v budúcnosti.

Stratégia WO (prevládajúce slabé stránky a príležitosti) sa pokúša o minimalizáciu slabostí a maximalizáciu príležitostí. Keďže externé parametre sú prevažne priaznivé, je potrebné zamerať sa najmä na interné parametre – overenie nových zásob, zvýšenie stupňa preskúmanosti zásob a poznania banskotechnických podmienok. Spravidla ide o nevyužívané ložisko s perspektívou využívania pri priaznivej zmene interných parametrov alebo napr. ťažené hlbinné ložisko, no s vyčerpanými zásobami, resp. nízkou kvalitou.

Stratégia ST (prevládajúce silné stránky a ohrozenia) vychádza z predpokladu, že sa silné stránky stretnú s hrozbami vo vonkajšom prostredí. Priaznivé interné parametre sú základom možného využitia ložiska nerastnej suroviny za predpokladu zlepšenia (vyriešenia) externých parametrov (legislatívny status – konflikty záujmov, vlastnícke vzťahy, zvýšený dopyt, budovanie infraštruktúry). Spravidla ide o nevyužívané ložisko s dostatočnými zásobami a vyhovujúcou kvalitou, s perspektívou využívania pri výraznej priaznivej zmene externých parametrov (dopyt, ceny, infraštruktúra).

Stratégia SO (prevládajúce silné stránky a príležitosti) je najviac žiadanou situáciou, pri ktorej je možné využiť silné stránky na využitie príležitostí. Vzhľadom na priaznivé interné parametre, ktoré sú viac-menej stabilné, je podstatné zamerať sa na udržanie priaznivých externých parametrov. Spravidla ide o využívané ložisko alebo nevyužívané ložisko s dostatočnými zásobami a vyhovujúcou kvalitou, potenciálne využiteľné v aktuálnych podmienkach, resp. pri relatívne malej zmene externých faktorov.

Na výber stratégie sa používajú skupiny kritérií, ktoré hodnotia účelnosť (vecnú správnosť, vhodnosť a primeranosť pre daný projekt), realizovateľnosť (druh a množstvo zdrojov potrebných na realizáciu stratégie) a prijateľnosť (hodnotenie očakávaní, potrieb a priorít záujmových skupín). Takáto kategorizácia nevyklučuje prekrývanie niektorých kritérií (Sakál et al., 2007).

POĎAKOVANIE

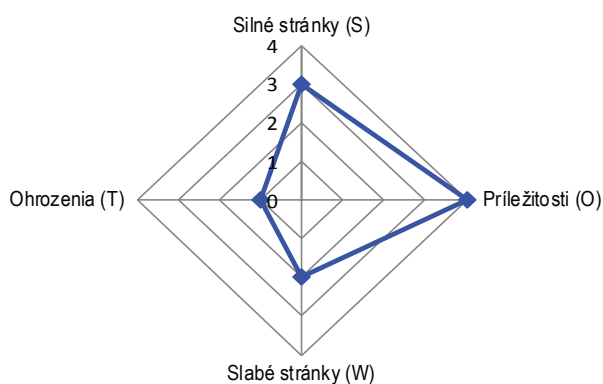
Prezentovaný materiál v článku je produktom prác v rámci projektu Ministerstva životného prostredia SR č. 607 12 *Surovinový potenciál Slovenskej republiky – analýza vybraných nerastných surovín* a je aj príspevkom Slovenska k riešeniu projektu EÚ *MINATURA 2020*.

Príklad hodnotenia

Tab. 5

Rožňava – Strieborná žila, Ag + Cu rudy, 2016 – hodnotiace faktory ložiska a bodovanie.
 Rožňava – Strieborná žila vein, Ag + Cu ore, 2016 – evaluation deposit factors and scoring.

Interné faktory				Komentár k interným faktorom
S (silné stránky)		W (slabé stránky)		
Množstvo zásob				– zvolené kritérium je obsah striebra v rude, odhad vytťažiteľných zásob zodpovedá malému ložisku
1	kategória min. malé ložisko	kategória ložiskový výskyt	0	
Kategória preskúmanosti zásob				– väčšina zásob overená v kategórii Z-2
1	zásoby kategórie Z-1 a Z-2	zásoby kategórie Z-3	0	
Kvalita a technologické vlastnosti suroviny				– obsah kovov Ag a Cu a technologické vlastnosti suroviny vhodné na hydrometallurgickú úpravu rudy
1	vhodné na spracovanie a využitie suroviny	obmedzená vhodnosť na využitie suroviny	0	
Uloženie a spôsob otvárky ložiska				– hlbinné ložisko
0	povrchové ložisko – lom	hlbinné ložisko – podzemná baňa	1	
Banskotechnické podmienky				– zložité banskotechnické podmienky – pozícia pod miestnou eróznou bázou, hydrogeologické pomery klasifikované ako stredne obťažné (III. stupeň), zvýšená obťažnosť (V. stupeň) v blízkosti tektonických zón
0	jednoduché banskotechnické podmienky	zložité banskotechnické podmienky	1	
Externé faktory				Komentár k externým faktorom
O (príležitosti)		T (ohrozenia)		
Legislatívny status				– povolená banská činnosť, vyriešené konflikty záujmov
1	povolená banská činnosť	nepovolená banská činnosť	0	
Aktuálny stav sprístupnenia zásob a infraštruktúra				– otvorené ložisko, v minulosti ťažené, čiastočne vybudovaná infraštruktúra
1	otvorené ložisko, vybudovaná infraštruktúra na ťažbu, úpravu a dopravu	neotvorené ložisko, bez vybudovanej infraštruktúry	0	
Ekonomická efektivita				– aktuálne ceny kovov Ag a Cu (11/2016) a odhad vytťažiteľných zásob aplikované na výsledky predbežného ekonomického hodnotenia (NI 43-101 Technical Report, 2015) neumožňujú ekonomickú rentabilitu projektu
0	ťažné ložisko alebo ekonomická efektivita preukázaná štúdiou (PEA, PFS, FS)	ekonomicky nehodnotené alebo ekonomická neefektivita preukázaná štúdiou (PEA, PFS, FS)	1	
Dopyt po surovine				– podľa záverov štúdie o kritických mineráloch (vypracované EK v r. 2010 a 2014) je obsah Ag a Cu kovov s ekonomickou dôležitosťou vyšší ako stanovená kritická hodnota – z hľadiska Aktualizácie surovinovej politiky (2004) rudy predstavujú strategické suroviny pre SR
1	ťažné ložisko alebo existuje dopyt na trhu, resp. deklarovaný hospodársky význam	nie je dopyt na trhu alebo deklarovaný hospodársky význam	0	
Posúdenie vplyvov na životné prostredie				– rozhodnutie okresného úradu z roku 2014 o neposudzovaní navrhovanej činnosti podľa zákona č. 24/2006 vzhľadom na to, že predpokladaná ťažba nedosahuje prahovú hodnotu
1	ťažné ložisko alebo kladné záverečné stanovisko posudzovania vplyvov na ŽP alebo navrhovaná činnosť nepodlieha posudzovaniu	záporné záverečné stanovisko posudzovania vplyvov na ŽP alebo navrhovaná činnosť nebola posudzovaná	0	



Obr. 2. Znáznornenie hodnotiacich faktorov v grafe SWOT.
Fig. 2. Illustration of the evaluation factors in the SWOT graph.

Tab. 6

Sumárne hodnotenie SWOT ložiska Rožňava – Strieborná žila.
 Summary SWOT evaluation of Rožňava – Strieborná žila vein deposit.

Interné faktory (IF)		Body IF
S (silné stránky)	W (slabé stránky)	3 – 2 = 1
3	2	
Externé faktory (EF)		Body EF
O (príležitosti)	T (ohrozenia)	4 – 1 = 3
4	1	
Celkové hodnotenie		+4

Celkové hodnotenie (tab. 5 a 6) dosiahlo +4 body (perspektívne, resp. potenciálne perspektívne ložisko). Hodnotiace faktory vynesené do grafu SWOT (obr. 2) indikujú stratégiu využitia SO (prevládajúce silné stránky a príležitosti).

ZÁVER

Analýza SWOT predstavuje pomerne jednoduchý a rýchly spôsob (v závislosti od dostupnosti a kvality relevantných informácií) hodnotenia ložiskových objektov so zaradením do zvolených kategórií. Je potrebné si uvedomiť, že každé hodnotenie SWOT je viazané na konkrétne časové obdobie, keďže parametre hodnotenia, najmä externé, sa môžu v čase meniť.

Navrhovaný spôsob hodnotenia ložísk nerastných surovín je otvorený systém, ktorý je možné podľa potreby upravovať a prispôbovať potrebám hodnotiteľa. Uvedeným spôsobom je možné prvotne zhodnotiť jednotlivé ložiská alebo skupiny ložísk a v závislosti od cieľa hodnotenia následne selektovať objekty napríklad pre potreby štátnych orgánov a surovínovej politiky štátu, samosprávy alebo súkromných spoločností.

Literatúra / References

- BALÁŽ, P., STUPÁK, J., RADVANEC, M. a MIKUŠOVÁ, J., 2015: Surovinový potenciál Slovenskej republiky – analýza vybraných nerastných surovín. Závěrečná správa. *Manuskript. Bratislava, archív Št. Geol. Úst. D. Štúra*, 157 s.
- SAKÁL, P., BARAN, D., BOŽEK, P., CIBULKA, V., COOK, T. M., ČERNÁ, E., DOLINKOVÁ, Z., DRAHŇOVSKÝ, J., GILEJEVA, T. A., HAJNIK, B., HATIAŘ, K., HATIAŘOVÁ, K., HORŇÁK, F., ISMAGILOVA, L. A., JACINTO, D., JAHNÁTEK, E., JEDLIČKA, M., KUBOVIČ, M., LENORT, R., LIBERKO, I., LIBERKOVÁ, L., LOZENKO, V. K., MACHYNIÁK, M., MAMOJKA, M., MIHOK, J., MRVOVÁ, E., PAULOVÁ, I., RYBANSKÝ, R., SABLÍK, J., SAKÁL, M., SOKOLOVÁ, M., SERGEJEVA, I. G., ŠUJANOVÁ, J., UHROVČÍKOVÁ, P. a ZÁVADSKÝ, J., 2007: Strategický manažment v praxi manažéra. *SP Synergia, Tripsoft Trnava*, 699 s. ISBN 978-80-89291-04-5.
- ROTHWELL, P., 2010: What is a SWOT Analysis? *Freshbusinessthinking.com* (online), 25.5.2010. <http://www.freshbusiness-thinking.com/business_advice.php?AID=5743&Title=What+Is+A+SWOT+Analysis?>
- Vyhláška SGÚ č. 6/1992 Zb. o klasifikácii a výpočte zásob vyhradených ložísk.
- Zákon č. 44/1988 Zb. o ochrane a využití nerastného bohatstva (banský zákon) v znení zákona SNR č. 498/1991 Zb., zákona č. 558/2001 Z. z., zákona č. 203/2004 Z. z., zákona č. 587/2004 Z. z., zákona č. 479/2005 Z. z., zákona č. 219/2007 Z. z., zákona č. 577/2007 Z. z., zákona č. 73/2009 Z. z., zákona č. 104/2010 Z. z., zákona č. 114/2010 Z. z., zákona č. 258/2011 Z. z., zákona č. 311/2013 Z. z., zákona č. 160/2014 Z. z., zákona č. 285/2014 Z. z. a zákona č. 314/2014 Z. z.
- Zákon č. 24/2006 Z. z. o posudzovaní vplyvov na životné prostredie a o zmene a doplnení niektorých zákonov, v znení zákona č. 275/2007 Z. z., zákona č. 454/2007 Z. z., zákona č. 287/2009 Z. z., zákona č. 117/2010 Z. z., zákona č. 145/2010 Z. z., zákona č. 258/2011 Z. z., zákona č. 408/2011 Z. z., zákona č. 345/2012 Z. z., zákona č. 448/2012 Z. z., zákona č. 39/2013 Z. z., zákona č. 180/2013 Z. z., zákona č. 314/2014 Z. z., zákona č. 128/2015 Z. z. a zákona č. 125/2016 Z. z.

Evaluation of reserved mineral deposits usability applying a SWOT analysis

INTRODUCTION

SWOT analysis is a tool of strategic management. As follows from the name of this analysis, consisting of capital letters, its aim is to identify the Strengths/Weaknesses/

Opportunities and Threats, related to evaluated specific project. It is used mainly in the economic sphere for fast overview of the strategic situation of assessed entity (Sakál et al., 2007). Methodology was developed in the Stanford Research Institute in 1960-1970, during the analysis

of companies' planning processes (Rothwell, 2010). Number of other authors and institutions contributed to the development of the analysis. Within the geological project Mineral potential of the Slovak Republic - analysis of selected mineral resources (Baláž et al., 2015), the adaptation of the SWOT analysis has been proposed for the evaluation of mineral deposits. The modified methodology is the basis of this contribution, which is aimed at a more detailed explanation, modification and supplementation. The analysis is designed for the evaluation of reserved deposits in the legislative conditions of the Slovak Republic (categorization of reserves, mineral resources protection status, evaluation of conflicts of interest).

Principles

SWOT analysis is the identification of strengths (S), weaknesses (W), opportunities (O) and threats (T). Strengths and weaknesses are internal factors (internal analysis), opportunities and threats are external factors (external analysis). The basic element of the SWOT analysis is to identify and evaluate these factors. Selection of external and internal factors has been adapted to the evaluation of mineral deposits. The analysis also includes a scoring system of individual factors of SWOT matrix.

Identification of factors for the assessment of reserved mineral deposits

Selection of factors (parameters) was carried out in order to maximize embracing issues, affecting real use of mineral resources. Potential information sources, from which it is possible to draw the relevant information, are included.

Internal factors (strengths and weaknesses) characterize the internal (geological) aspects of mineral deposit, based on the results of exploration and reserves estimation: the amount of reserves, reserves category (classification), quality and technological properties of minerals, deposit geological position (setting) and viable way of deposit opening and technical mining conditions.

External factors (opportunities and threats) characterize the exterior (non-geological) aspects that have a direct impact on the exploitation possibilities: legislative status (including conflicts of interest), actual reserves availability (state of opening and mining works) and infrastructure, estimate of economic efficiency of exploitation, the demand for raw materials and environment impact assessment.

Rating system

Real evaluation of each factor (parameter) determines whether it is strength or weakness (internal parameters), respectively opportunity or threat (external parameters).

The parameters can be dynamically changed in time, although most of internal parameters (reserves, mineral/ore quality, technical mining conditions) represent relatively stable input items (Baláž et al., 2015). Any SWOT analysis is thus valid in a particular time period.

Rating system is rather simple, each parameter corresponds to 1 point in the evaluation, which is attributed to the strength or weakness (internal parameters), respectively to the opportunity or threats (external parameters). The model can also be used in case we do not have information on all parameters. In this case, a parameter to which we do not have adequate information is considered as weakness or threat respectively.

In presented model, the parameters are not matching different weight, since each parameter potentially represents a critical component of evaluation. Developing of model, using the allocation of different weights to individual parameters, can contribute to a more realistic assessment, but requires development of a balanced and functional scoring system, since not every parameter provides adequate possibility for scoring range.

SWOT strategies

SWOT analysis can be used to evaluate the situation and suggests the appropriate strategy by modelling of changes in input factors. It is noted that in the case of mineral deposits, internal parameters are set by the geological situation, which is a relatively constant for long time (level of knowledge may be changed and thus categorization of certain parameters). External parameters are, compared to internal, changing relatively quickly. There are four strategic options (quadrants) in the SWOT matrix – SO (prevailing strengths and opportunities), ST (prevailing strengths and threats), WO (prevailing weaknesses and opportunities) and WT (prevailing weaknesses and threats). These determine the appropriate strategy applicable to a particular situation.

CONCLUSION

SWOT analysis represents relatively simple and fast way (depending on the availability and quality of relevant information) for rating of mineral deposit objects and division into selected categories. It should be understood that any SWOT evaluation is linked to a particular time period, since used parameters, in particular external, may vary over time. The proposed method of evaluation of mineral resources is an open system that can be adjusted as appropriate and adapted to the needs of the evaluator. In this way, it is possible to initially evaluate individual mineral deposits or groups of deposits and depending on the objective of evaluation select objects to meet the needs of national authorities, mineral policy makers, local governments or private companies.

SWOT analysis matrix – defining the evaluation criteria:

Internal factors	
S (strengths)	W (weaknesses)
<i>Reserves amount</i>	
reserves corresponding minimally to small deposit category	reserves corresponding to deposit occurrence
<i>Category of reserves</i>	
reserves of Z-1 and Z-2 category	reserves of Z-3 category
<i>Quality and technological properties of mineral</i>	
mineral suitable for processing and use	limited mineral suitability for processing and use
<i>Geological settings and way of deposit opening</i>	
surface deposit – quarry	underground deposit – underground mine or combined (surface/underground) method
<i>Mining technical conditions</i>	
simple mining technical conditions	difficult mining technical conditions
External factors	
O (opportunities)	T (threats)
<i>Legislative status</i>	
mined deposit or obtained license for mining operations (solved conflicts of interest)	license for mining operations not obtained (conflicts of interest not solved)
<i>Actual reserves availability and infrastructure</i>	
mined deposit or open deposit, existing infrastructure for the extraction, processing and transport	deposit not open, no or insufficient infrastructure
<i>Economic efficiency</i>	
mined deposit, or economic efficiency proved by study (PEA PFS, FS)	not rated economically, or economic inefficiency proved by study (PEA PFS, FS)
<i>Demand for mineral</i>	
mined deposit, or there is a demand in the market or declared economic importance	no, or weak demand in the market, no economic importance declared
<i>Environment impact assessment (EIA process)</i>	
mined deposit, or a positive statement of the final environmental impact assessment or the proposed activity is not subject to assessment	negative statement of the final environmental impact assessment or the proposed activity was not assessed

ACKNOWLEDGEMENT

Material presented in this paper is a product of the project of Ministry of Environment of the Slovak Republic No. 607 12 – *Raw material potential of the Slovak Repub-*

lic – analysis of selected raw materials. It is also a contribution of Slovakia for the EU project *MINATURA 2020*.

Doručené / Received: 10. 12. 2016
Priaté na publikovanie / Accepted: 15. 12. 2016

Inštrukcie autorom

Etika publikovania, záväzná pri publikovaní v časopise Mineralia Slovaca:

www.geology.sk/new/mineralia_etika_publicovania

1. Geovedný časopis Mineralia Slovaca publikuje scientometricky hodnotné recenzované pôvodné vedecké články s vysokým citačným potenciálom. V úvode príspevku musí autor jasne deklarovať, čím konkrétnym je jeho príspevok prínosný pre rozvoj geovied. Rešeršné štúdie sa publikujú len ojedinele.

2. Články na publikovanie (manuskripty) sa do redakcie zasielajú poštou (dva vytačené exempláre a CD so všetkými súbormi v editovateľnej podobe) alebo e-mailom (editovateľné súbory a kompletná verzia vo formáte PDF).

3. Súčasne s článkom je potrebné redakcii poslať autorské vyhlásenie o originalite textu a obrázkov. Kópie obrázkov z iných publikácií musia byť legalizované získaním práva na publikovanie. Vyhlásenie musí obsahovať meno autora (autorov), akademický titul a trvalé bydlisko.

4. Rozsah manuskriptu na publikovanie je najviac 25 rukopisných strán (MS Word, Times New Roman, veľkosť písmen 12 bodov, riadkovanie 1,5) vrátane literatúry, obrázkov a vysvetliviek. V prípade veľkého odborného prínosu sú v ojedinelých prípadoch povolené aj dlhšie články.

5. Články sú publikované v angličtine alebo v slovenčine. Články v slovenčine musia obsahovať anglický preklad názvu, abstraktu, kľúčových slov, resumé a popisov k obrázkom a tabuľkám. Články písané v angličtine musia obsahovať slovenské resumé.

Text

1. Abstrakt stručne sumarizuje článok. Môže mať najviac 200 slov a nemá obsahovať citácie. Počet kľúčových slov je maximálne 6. Text má mať úvod, charakteristiku (stav) skúmaného problému, použitú metodiku, nové zistenia, ich interpretáciu, diskusiu, záver a zoznam literatúry. Východiskové údaje musia byť zreteľne odlišné od interpretácií. V texte musia byť odvolávky na všetky použité obrázky a tabuľky.

2. Hierarchiu nadpisov v texte je potrebné vyznačiť ceruzkou na ľavom okraji strany manuskriptu: 1 – najvyššia, 2 – nižšia, 3 – najnižšia.

3. V texte sa uprednostňuje citácia v zátvorke, napr. (Dubčák, 1987; Hrubý et al., 1988), pred formou ..., podľa Dubčáka (1987).

4. Pozícia obrázkov a tabuliek v texte sa označí. Nie je vhodné, aby text v editore MS Word obsahoval vložené obrázky, ale náhľadová verzia v pdf ich má obsahovať.

5. Grécke písmená treba identifikovať na ľavom okraji slovom (napr. sigma). Potrebne je odlišovať pomlčku od spojovníka. Symboly, matematické značky, názvy skamenín a pod., ktoré sa majú vysádzať kurzívou, autor v rukopise podčiarkne vlnovkou.

Obrázky a tabuľky

1. Ilustrácie a tabuľky vysokej kvality bývajú publikované buď na šírku stĺpca (81 mm), alebo strany (170 mm). Optimálna veľkosť písma a čísiel v publikovaných obrázkoch je 2 mm. Články v slovenčine musia mať popisy v obrázkoch a tabuľkách v slovenčine, záhlavie tabuliek a texty pod obrázkami a tabuľkami sú v slovenčine a angličtine. Články v angličtine majú všetky texty v angličtine. **Maximálny rozmer ilustrácie a tabuľky vytačený v časopise je 170 x 230 mm.** Väčšie (skladané) ilustrácie sú publikované len v ojedinelých prípadoch.

2. Pri počítačovej tvorbe obrázkov odporúčame používať programy s vektorovým zobrazením (Corel Draw, Adobe Illustrator a pod.). Čiary tzv. vlasovej hrúbky, softvérová alebo rastrová výplň plôch (napr. v Corel Draw) nie sú prípustné. Výplne v obrázkoch musia pozostávať zo samostatne vysádzaných objektov.

3. Ilustrácie vrátane fotografií musia obsahovať **grafickú mierku** v centimetrovej či metrovej škále, prípadne sa rozmer zobrazených objektov vyjadriť v popise obrázka. Mapy a profile musia mať aj **azimutálnu orientáciu** a jednotné vysvetlivky, ktoré sa uvedú pri prvom obrázku. Zoskupené obrázky, napr. fotografie a diagramy, sa uvádzajú ako jeden obrázok s jednotlivými časťami označenými písmenami (a, b, c atď.).

4. Pri zasielaní fotografií vo forme počítačových súborov (formáty JPG alebo TIF) sa požaduje rozlíšenie minimálne 600 DPI. Publikovanie farebných ilustrácií môže byť spoplatnené.

Literatúra

1. Minimálne 50 % citácií musí reprezentovať publikácie od roku 2000. V zozname literatúry sa v abecednom poradí uvádza len literatúra citovaná v danom článku.

2. Spôsob uvádzania literatúry v zozname literatúry

Knižná publikácia: GAZDA, L. & ČECH, M., 1988: Paleozoikum medzevskeho príkrovu. Bratislava, Alfa, 155 s.

Časopis: VRBA, P., 1989: Strižné zóny v metapelitoch. *Miner. Slov.*, 21, 135 – 142.

Zborník: NÁVESNÝ, D., 1987: Vysokodraselné rhyolity. In: Romanov, V. (ed.): Stratiformné ložiská gemerika. Špec. publ. Košice, Slov. geol. spol., 203 – 215.

Manuskript: RADVANSKÝ, F., SLIVKA, B., VIKTOR, J. & SRNKA, T., 1985: Žilné ložiská jedloveckého príkrovu gemerika. Záverečná správa z úlohy SGR-geofyzika. *Manuskript. Spišská Nová Ves, archív Št. Geol. Úst. D. Štúra*, 28 s.

3. Pri článku viac ako dvoch autorov sa v texte cituje iba prvý autor s dodatkom et al., ale v zozname literatúry sa uvádzajú všetci.

Instructions to authors

Publication ethics, being obligatory for publishing in the journal Mineralia Slovaca:

www.geology.sk/new/mineralia_publication_ethics

1. Geoscientific journal Mineralia Slovaca publishes scientometrically valuable original peer-reviewed scientific articles with a high citation potential. In the introduction of each article the author(s) must clearly declare, which innovative data the paper brings for the development of geosciences. The retrieval studies are published only exceptionally.

2. The articles for publishing (manuscripts) must be sent to Editorial Office by post (two printed copies and CD with editable files), or by e-mail (editable files plus complete preview version in PDF format).

3. Simultaneously with the article the Editorial Office must receive the author's proclamation that no part of the manuscript was already published and figures and tables are original as well. Copied illustrations from other publications must contain a copyright.

4. The extent of the manuscript for publishing is limited to 25 manuscript pages (MS Word, 12 points Times New Roman, line spacing 1.5) including figures, tables, explanations and references. In the case of contribution with a high scientific value, the longer manuscripts for publishing are exceptionally permitted.

5. Articles can be published in Slovak or English languages. The title, abstract, key words, shortened text (resumé), as well as description to figures and tables in Slovak articles are published also in English. Articles published in English contain Slovak resumé.

Text

1. Abstract briefly summarizing the article is limited to 200 words, no references are allowed. The maximum number of key words is 6. Text of the article has to contain the introduction, characterization (state) of investigated problem, applied methodology, obtained new data, discussion, conclusion and references. The obtained data must be distinctly separated from interpretations. All applied figures and tables must be referred in the text.

2. The hierarchy of headings in the manuscript must be indicated by a pencil note: 1 – highest level, 2 – lower, 3 – lowermost level.

3. The references in the text prefer parentheses, e.g. (Dubčák, 1987; Hrubý et al., 1988). The form "according to Dubčák (1987)" should be used only exceptionally.

4. Position of figures and tables must be indicated in the manuscript. Editable text of manuscript sent to editorial office must be without figures and tables, though the preview PDF has to contain them in a correct position.

5. Greek letter in the text must be identified at the left margin of the text (e.g. sigma). The text should strictly distinguish the dash from hyphen. Symbols, mathematic signs, names of fossils, etc., which should be printed in italics, must be underlined by the wavy line in the manuscript.

Figures and tables

1. The high quality figures and tables can be published either in **maximum width of column (81 mm) or page (170 mm)**. The optimum size of letters and numbers in the camera-ready figure is 2 mm. Articles published in Slovak contain the Slovak descriptions in figures and tables, the tables headings and descriptions beneath figures and tables are in Slovak and English. English articles contain all texts in English. **Maximum dimension of figures and tables in the journal is 170 x 230 mm. Larger (folded) illustrations are published only exceptionally.**

2. For figures drawing the editorial office recommends the vector graphics editors (Corel Draw, Adobe Illustrator, etc.). The very thin lines (hair lines), the pre-defined software or raster fillings of polygons (e.g. in Corel Draw) are not allowed. The filling must consist from separately set objects.

3. Each illustration including photographs must contain graphic (metric) scale, eventually the dimensions of visualized objects have to be stated in the describing text to figure. Maps and profiles must contain also the azimuth orientation, their detail explanations are stated at the first figure. Grouped figures, e.g. photographs and diagrams, are compiled as one figure with separate parts designated by letters (a, b, c, etc.).

4. The photographs sent as JPG or TIF files are required for having minimum 600 DPI resolution. Publishing of colour illustrations can be charged by a fee.

References

1. Minimum 50 % of referred works must represent contemporary publications after 2000. The references in alphanumeric order encompass only literature cited in the article.

2. Examples of referring:

Book: GAZDA, L. & ČECH, M., 1988: Paleozoic of the Medzev nappe. Bratislava, Alfa, 155 p.

Journal: VRBA, P., 1989: Shear zones in the metapelite complexes. *Miner. Slov.*, 21, 135–142.

Anniversary volume: NÁVESNÝ, D., 1987: High-potassium rhyolites. In: Romanov, V. (ed.): Stratiform deposits of Gemericum. Spec. publ. Košice, Slov. geol. soc., 203–215.

Manuscript: RADVANSKÝ, F., SLIVKA, B., VIKTOR, J. & SRNKA, T., 1985: Vein deposits of the Jedlovec nappe of Gemericum. Final report from the project SGR-geophysics. *Manuscript. Spišská Nová Ves, Archive Št. Geol. Úst. D. Štúra*, 28 p.

3. The article with more than two authors is referred by the name of the first author with the amendment et al., but the list of references contains names of all authors.

OBSAH – CONTENT

PÔVODNÉ ČLÁNKY – ORIGINAL PAPERS

Németh, Z. & Putiš, M.

RNDr. Pavol Grecula, DrSc., geovedec európskeho formátu, oslávil osemdesiatku

RNDr. Pavol Grecula, DrSc., geoscientist of European format, has celebrated his eightieth birthday

Radvanec, M. & Grecula, P.

Geotectonic and metallogenetic evolution of Gemericum (Inner Western Carpathians) from Ordovician to Jurassic

Geotektonický a metalogenetický vývoj gemerika od ordoviku po juru

Németh, Z., Putiš, M. & Hraško, L.

The relation of metallogeny to geodynamic processes – the natural prerequisite for the origin of mineral deposits of public importance (MDoPI): The case study in the Western Carpathians, Slovakia

Podmienenosť metalogenézy geodynamickými procesmi – primárna podmienka vzniku ložísk nerastov verejného významu (MDoPI): prípadová štúdia zo Západných Karpát

Putiš, M., Li, J., Ružička, P., Ling, X. & Nemec, O.

U/Pb SIMS zircon dating of a rhyolite intercalation in Permian siliciclastics as well as a rhyodacite dyke in micaschists (Infrataticum, W. Carpathians)

U/Pb SIMS datovanie zirkónu ryolitovej interkalácie v permských sedimentoch a dajky ryodacitu v svoroch (infratatrikum, Z. Karpaty)

Hangáč, R., Dlapa, P., Antal, B., Zvara, I., Kočícký, D. & Zlocha, M.

Modelovanie sorpčných vlastností pôd Slovenska pre potreby geologického informačného systému

Modelling of the sorption properties of soils in Slovakia for the purposes of geological information system

Jurkovič, L., Šottník, P., Sekula, P., Peťková, K., Kotúč, J., Leššo, J., Bačík, M., Hiller, E. & Malý, V.

Geochemické hodnotenie environmentálnych rizík na lokalite opusteného Hg ložiska Merník (východné Slovensko)

Geochemical evaluation of environmental risks in locality of abandoned Hg-deposit Merník (Eastern Slovakia)

Baláž, P.

Hodnotenie využiteľnosti výhradných ložísk nerastných surovín aplikáciou analýzy SWOT

Evaluation of reserved mineral deposits usability applying a SWOT analysis