Výzkum paleomagnetického záznamu v sedimentech v nadloží hlavní uhelné sloje mostecké pánve (spodní miocén)

Investigation of the paleomagnetic record of sediments overlying the Main Coal Seam in the Most Basin (Lower Miocene)

Richard Štorc[1] – Hakan Ucar[1, 2] – Šimon Kdýr[2] – Günther Kletetschka[1, 4] – Petr Schnabl[2] – Kristýna Šifnerová[2] – Ondřej Pour[3] – †Miroslav Krs[2]

[1] Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užité geofyziky, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, Albertov 6, 128 43 Praha 2; rstorc@seznam.cz
[2] Geologický ústav AV ČR, v. v. i., Rozvojová 269, 165 02 Praha 6
[3] Česká geologická služba, Klárov 131/3, 118 00 Praha 1
[4] Geophysical Institute, University of Alaska, 2156 N Koyukuk Drive, Fairbanks, Alaska 99775, USA

Please cite this article as: Štorc, R. – Ucar, H. – Kdýr, Š. – Kletetschka, G. – Schnabl, P. – Šifnerová, K. – Pour, O. – Krs, M. (2025): Investigation of the paleomagnetic record of sediments overlying the Main Coal Seam in the Most Basin (Lower Miocene). – Geoscience Research Reports, 58, 1, 25–30. (in Czech)

Key words: paleomagnetism, magnetostratigraphy, rock magnetism, Most Basin, Miocene, Burdigalian

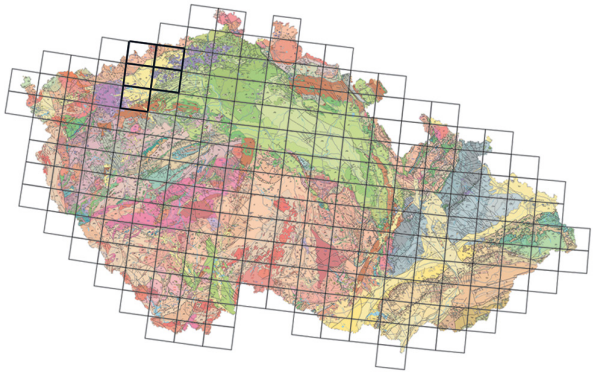
Summary: Current paleomagnetic investigations in the Most Basin are unique among the recent studies as the number of explored localities and samples, and use of up-to-date equipment concerns. Extensive lacustrine and fluvio-deltaic deposits overlying the Main Coal Seam (Most Formation, Lower Miocene) are the subject of the research. This article summarises the main results of investigations in magnetostratigraphy and rock magnetism in context with other related disciplines since 2014.

So far, magnetostratigraphic analysis has been carried out on the following boreholes 70–380 m deep from both central and marginal parts of the basin: SP269 (Spořice), HK591, HK772 and HK930 (the former Hrdlovka village), HD50 (Háj u Duchcova), A24 (Srbice u Teplic), ZU5A (Chabařovice), LB432 (the former Libkovice village), OS17 (Osek), DO565 (Droužkovice), AL505 (the former Albrechtice village), DU7 (Dubí u Teplic), JU2183 (the former Jenišův Újezd village), MR93 (Mariánské Radčice), ZL70 (Litvínov-Záluží), and RL8 (the former Růžodol village).

In terms of magnetostratigraphy, we demonstrate that a local lake was present in the Bílina area from the end of paleomagnetic chron ***C5Dr.2r*** through chron ***C5Dr.1n*** to the beginning of the ***C5Dr.1r*** chrons (Holešice Member). The progradation of the Bílina Delta took place during the end of ***C5Dr.2r*** and its rapid development occurred mainly during the ***C5Dr.1n*** subchron. The coalescence of small local lakes began in the ***C5Dr.2r*** subchron and early in the ***C5Dr.1r*** chron culminated in the formation of a large basin-wide lake. Substantial changes occurred at the Holešice/Libkovice boundary near the ***C5Dr.1r***/***C5Dn*** reversal when hydrology of the basin-wide lake changed. The sediments of the Libkovice Member were deposited over a period of ca. 1.0 million years during ***C5Dn***, ***C5Cr***, and ***C5Cn.3n*** chrons. The beginning of the Miocene Climatic Optimum is also dated to this period. In the Lom Member sediments, geomagnetic polarity was not measurable; the ***C5Cn.2r***/***C5Cn.2n*** reversal was thus not recovered, and most of ***C5Cn.2n*** was missing in the record. The youngest lithostratigraphic unit in which geomagnetic polarity has been measured is the Osek Member with sediments of the second basin-wide lake. Here, the Most Basin record ends at ***C5Cn.1n*** chron in the uppermost part of the Burdigalian. This comprehensive magnetostratigraphic framework allows for chronological understanding for the basin evolution from small isolated lakes to a major basin-wide system, terminating about 15.9 million years ago.

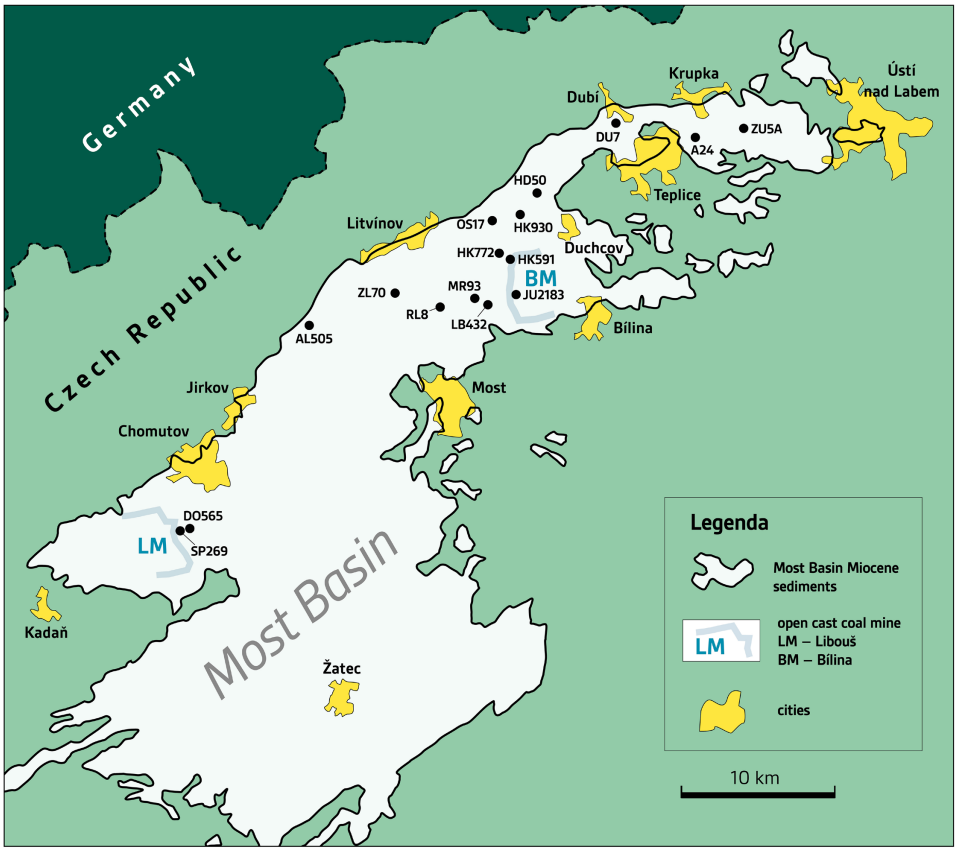
Note that, in magnetostratigraphic studies, identification of sedimentary magnetic carriers is crucial for ensuring the reliability of paleomagnetic records. However, our understanding of this issue remained limited until the recent study of the RL8 core. The findings indicate that the magnetic carriers in the studied section consist of a mixture of diagenetic greigite and biogenic magnetite, implying that the paleomagnetic age is younger than the sediment itself. This discovery should be considered in the chronostratigraphic framework of the Most Basin. Yet, the character of magnetic carriers in the cores from different parts of the basin remains an open question.

The objective of this multidisciplinary research of the Most Basin is not only to make the stratigraphic scale significantly more accurate, but also to acquire better knowledge of paleogeography and environmental changes during Miocene.



(02-31 Litvínov, 02-32 Teplice, 02-33 Chomutov, 02-34 Bílina, 12-11 Žatec)

DOI 10.3140/zpravy.geol.2025.04



Obr. 1. Mapa mostecké pánve s polohami studovaných vrtů. Upraveno podle Matyse Grygara et al. (2017a, b, 2019a, 2021), Macha et al. (2021) a Ucara et al. (2024).
Fig. 1. Map of the Most Basin with position of the studied boreholes. Modified after Matys Grygar et al. (2017a, b, 2019a, 2021), Mach et al. (2021), and Ucar et al. (2024).

V posledních letech probíhá intenzivní studium paleomagnetismu v sedimentárním záznamu mostecké (severočeské hnědouhelné) pánve (obr. 1). Jeho předmětem jsou rozsáhlé fluvio-deltové a jezerní uloženiny miocenního stáří. Cílem je nejen zásadní zpřesnění stratigrafické škály a identifikace minerálních nosičů horninového magnetismu, ale také poznání paleogeografie a environmentálních změn v neogénu.

Díky modernizovanému přístrojovému vybavení paleomagnetické laboratoře v Průhonicích (Geologický ústav AV ČR) a velkému počtu analyzovaných vzorků a lokalit tento výzkum výrazně přesahuje předchozí studie paleomagnetismu v mostecké pánvi. Níže je uveden přehled hlavních výsledků magnetomineralogie a magnetostratigrafie od roku 2014.

Poznámka ke stratigrafii

Objektem výzkumu je ta část mosteckého souvrství, která se nachází nad hlavní uhelnou slojí (obr. 2). V nejvyšší části holešických vrstev to jsou především holešické a břešťanské jíly. Nadloží tvoří libkovické vrstvy s masivními jíly celopánevního jezera a lomské vrstvy s jíly, uhelnou slojí a jejími laterálními ekvivalenty. Nejvyšší stratigrafickou úroveň potom utvářejí monotónní jezerní jíly oseckých vrstev. Uvedené jednotky náleží burdigalu (spodní miocén) a jejich paleomagnetické členění vychází z Hilgena et al. (2012), Kochhanna et al. (2016) a Ogga (2020).

Metody

Pro potřeby paleomagnetismu byly z vrtů v různých částech pánve odebrány tisíce vertikálně orientovaných vzorků jílovitých sedimentů, a to vždy 1 na metr u vrtných jader HK591, HK772, LB432, HD50, ZU5A, A24, DO565, OS17 a 1 až 3 na metr u dalších zkoumaných jader (Matys Grygar et al. 2014, 2017a, b, 2019a, 2021). U vrtu RL8 (Ucar et al. 2024) byly dokonce vzorky odebírány každých 6,7 centimetru. Pro identifikaci magnetických minerálů, jejich původu, zrnitosti a koncentrace byly ve studovaných horninách měřeny a vyhodnocovány vratné křivky prvního řádu (FORC), magnetická hystereze, anhysterezní remanentní magnetizace, izotermální remanentní magnetizace, magnetická susceptibilita a anizotropie susceptibility. Pro mikroanalýzu různých minerálních fází železa bylo následně užito rastrovací elektronové mikroskopie a energeticky disperzní rentgenové spektroskopie. Pro potřeby magnetostratigrafie byly vzorky odebírány z vrtů a částečně také přímo ze stěn lomů. Následně proběhla demagnetizace střídavým polem a měření přirozené remanentní magnetizace. Více viz Matys Grygar et al. (2014, 2017a, b, 2019a, 2021) a Ucar et al. (2024).

Magnetostratigrafické korelace a chronologie událostí v mostecké pánvi

Analyzovány byly vrty o délce 70 až 380 m, a to jak z centrální, tak z okrajových částí mostecké pánve pro omezení

specifických vlivů místních snosných oblastí a tektoniky (viz obr. 1 a 3). V několika fázích výzkumu (Matys Grygar et al. 2017a, b, 2019a, 2021; Ucar et al. 2024; viz též Mach et al. 2021: Fig. 2) byly odebírány vzorky z vrtů SP269 (Spořice), HK591, HK772 a HK930 (býv. obec Hrdlovka), LB432 (býv. obec Libkovice), HD50 (Háj u Duchcova), ZU5A (Chabařovice), A24 (Srbice u Teplic), DO565 (Droužkovice), OS17 (Osek), AL505 (býv. obec Albrechtice), DU7 (Dubí u Teplic), JU2183 (území býv. obce Jenišův Újezd uvnitř lomu Bílina), MR93 (Mariánské Radčice), ZL70 (Litvínov-Záluží), RL8 (býv. obec Růžodol) a navíc byla opětovně studována některá starší vrtná jádra.

K určení horninového stáří a korelaci vrtů bylo užito kombinace magneto-, cyklo- a chemostratigrafie (Matys Grygar – Mach 2013a, b; Matys Grygar et al. 2019a, b, 2021; Mach et al. 2021; Novotný et al. 2021; Ucar et al. 2024) a v libkovických vrstvách také metody stanovení radioizotopového stáří biotitu obsaženého ve vulkanogenních vrstvičkách (Mach et al. 2021). Díky tomu došlo k velkému upřesnění v datování a je možné detailně popsat chronologický sled událostí v mostecké pánvi:

Koncem magnetochrony ***C5Dr.2r*** (před cca 17,8 až 17,7 mil. let) zintenzivnila progradace bílinské delty a během magnetické subchrony ***C5Dr.1n*** probíhal její velmi rychlý postup, což je doloženo velkými akumulacemi deltových sedimentů v krátkém čase. Podle Hilgena et al. (2012) i Kochhanna et al. (2016) má totiž délka subchrony ***C5Dr.1n*** rozsah pouhých 20 až 40 tisíc let.

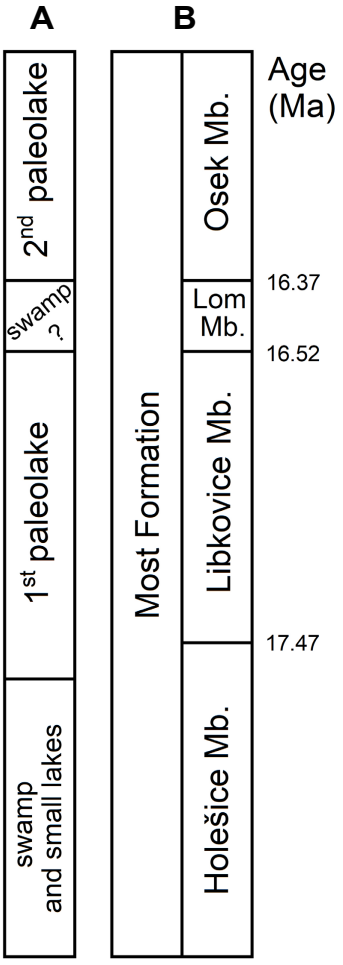
Ve vyšších částech holešických vrstev je prokázána přítomnost několika izolovaných jezer, a to jak v nadloží hlavní uhelné sloje, tak v jejích laterálních ekvivalentech. Paleojezero v prostoru kolem dnešního lomu Bílina pravděpodobně existovalo již na konci magnetochrony ***C5Dr.2r*** a přetrvávalo v průběhu ***C5Dr.1n*** až do počátku magnetochrony ***C5Dr.1r*** (před cca 17,7 až 17,6 mil. let). Ve starších fázích výzkumů (viz Matys Grygar et al. 2017b) se také usuzovalo, že Bílinské jezero mohlo vzniknout již v době magnetochron ***C5Er*** a ***C5En***.

Postupné zaplavování močálů a propojování těchto malých lokálních jezer začalo v magnetochroně ***C5Dr.2r***, v průběhu ***C5Dr.1n*** zintenzivnilo a v rané fázi magnetické subchrony ***C5Dr.1r*** vyvrcholilo vznikem rozsáhlého celopánevního jezera. Vzhledem k tomu, že magnetochrona ***C5Dr.1n*** nebyla v jádrech vrtů ZL70, HK930 a DU7 identifikována, se můžeme domnívat, že severní část pánve byla zaplavena později než její střed.

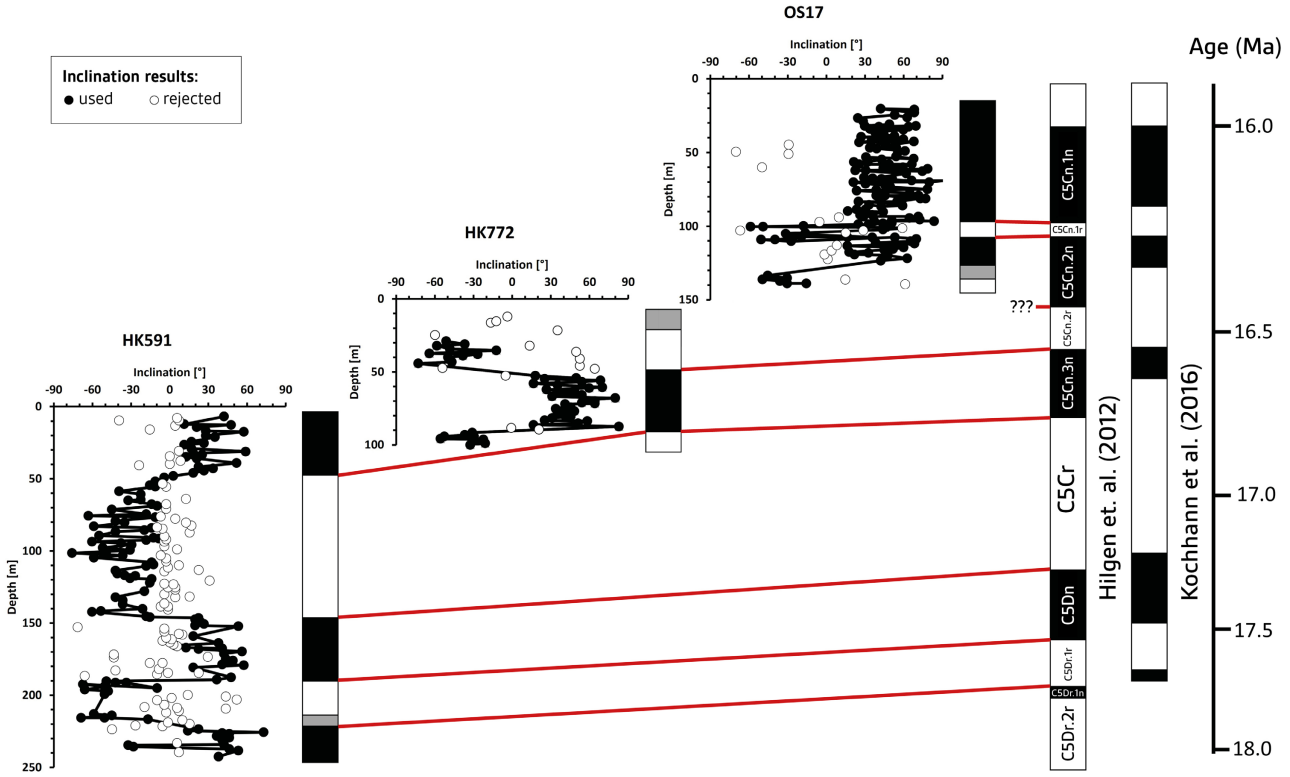
Na hranici holešických a libkovických vrstev (obr. 2) došlo k výrazné změně mineralogie jílové složky sedimentů. Tuto událost je možné datovat na 17,47 mil. let (Kochhann et al. 2016, Matys Grygar et al. 2019a) a došlo k ní v blízkosti změny magnetické polarity z ***C5Dr.1r*** na ***C5Dn***. V té době se změnil celkový hydrologický režim paleojezera. Monotónní masivní jíly libkovických vrstev se poté v celopánevním jezeře ukládaly po dobu asi jednoho milionu let během magnetochron ***C5Dn***, ***C5Cr*** a ***C5Cn.3n***. Do tohoto časového úseku je datován počátek miocenního klimatického optima. V libkovických vrstvách se také nachází několik crandallitových vrstviček, které jsou v mostecké pánvi důležitými korelačními horizonty a indikátory změn prostředí (Mach et al. 2021; Matys Grygar – Mach 2013a, b; Matys Grygar et al. 2017a, 2021; Novotný et al. 2021).

Následují lomské vrstvy, které vznikaly před 16,52 až 16,37 mil. lety (Matys Grygar et al. 2021 a obr. 2). Uhelná sloj je silně jílovitá, se značným podílem organické hmoty vodního původu. To poukazuje na skutečnost, že v období rozsáhlých rašelinišť alespoň částečně přetrvávalo jezerní prostředí. V sedimentech lomských vrstev nebyla geomagnetická polarita zachována, k čemuž pravděpodobně došlo v důsledku rozpouštění původních magnetických nosičů v kyselém prostředí v důsledku zvýšeného obsahu organické hmoty (Matys Grygar et al. 2019a, 2021). Změna magnetické polarity ***C5Cn.2r***/***C5Cn.2n*** tak nebyla objevena a větší část magnetochrony ***C5Cn.2n*** v sedimentárním záznamu mostecké pánve chybí (Matys Grygar et al. 2019a; 2021: Fig. 8).

Stratigraficky nejmladší erozní zbytek oseckých vrstev tvoří monotónní jíly (zastiženy byly zejména ve vrtu OS17), které jsou dokladem druhého paleojezera neznámé



Obr. 2. Paleoprostředí (A) a členy (vrstvy) mosteckého souvrství (B). Upraveno podle Matyse Grygara et al. (2017a, 2019b); datování je převzato z Matyse Grygara et al. (2021).
Fig. 2. Paleoenvironment (A) and members of the Most Formation (B). Modified after Matys Grygar et al. (2017a, 2019b); dating was taken from Matys Grygar et al. (2021).



Obr. 3. Korelační schéma sestavené podle vrtných jader HK591, HK772 a OS17. Porovnání magnetozón z jednotlivých profilů s magnetostratigrafickými časovými škálami podle Hilgena et al. (2012) a Kochhanna et al. (2016). Černá = polarita normální, bílá = polarita reverzní, šedá = polarita nejistá. Upraveno podle Matyse Grygara et al. (2019a, 2021) a Macha et al. (2021).
Fig. 3. Correlation scheme compiled from drill cores HK591, HK772 and OS17. Stack of magnetic polarity records compared with polarity time scale by Hilgen et al. (2012) and Kochhann et al. (2016). Black = normal polarity, white = reverse polarity, gray = uncertain. Modified after Matys Grygar et al. (2019a, 2021) and Mach et al. (2021).

mého rozsahu. Horninový záznam spodního miocénu končí v oseckých vrstvách přítomností magnetochrony ***C5Cn.1n*** (před 16,26 až 15,99 mil. let podle Kochhanna et al. (2016); resp. 16,27 až 15,97 mil. let podle Hilgena et al. (2012)), která v mosteckém souvrství představuje závěrečnou fázi burdigalu. Sedimenty mladší než cca 15,9 milionu let zde kvůli následné inverzi pánve již nejsou přítomny.

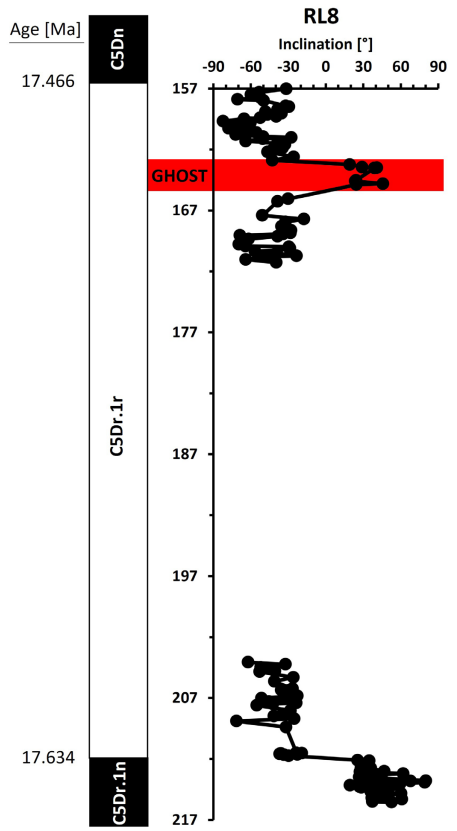
Nosiče horninového magnetismu

Významného pokroku bylo dosaženo v oblasti magnetomineralogie. Ačkoliv jsou usazeniny mostecké pánve již více než 150 let předmětem vědeckého bádání, nosiče magnetismu studovaných hornin nebyly až donedávna jednoznačně identifikovány. První pokus o jejich určení provedli Matys Grygar et al. (2014), kteří prokázali přítomnost směsi magnetických minerálů s nízkou, střední a vysokou koercitivitou, zahrnující například magnetit, maghemit a hematit.

Klíčové otázky týkající se spolehlivosti minerálních nosičů magnetismu nakonec vyřešil nedávný výzkum Ucara et al. (2024). Jejich studie analyzovala vzorky z vrtu RL8 nacházejícího se na území bývalé obce Růžodol (obr. 1). Výzkum zahrnoval 27 metrů sedimentů z těsného nadloží hlavní uhelné sloje, kde spodní část tvořily holešické a břešťanské jíly a vrchní část jíly z báze libkovických vrstev. Ucar et al. (op. cit.) prokázali, že tyto nosiče tvoří směs autigenního greigitu a magnetitových magnetofosilií s překrývajícími se magnetickými vlastnostmi. Prvními, kdo v pánvích oherského riftu doložili přítomnost greigitu, byli Krs et al. (1990, 1991, 1992, 1993). Tento nerost vzniká při průchodu pórové vody sedimentárním sloupcem, kde železo ze sideritu reaguje s těmito tekutinami za podmínek omezeného množství H_2S, což podporuje vysrážení greigitu. Současný výskyt greigitu a magnetitu naznačuje částečné rozpouštění magnetofosilií v důsledku nedostatku H_2S.

Diagenetický greigit však v paleomagnetických studiích představuje problém kvůli časovému odstupu mezi sedimentací a získáním chemické remanentní magnetizace, který činí přibližně 45 tisíc let. Toto zpoždění by mohlo způsobovat, že hranice magnetické polarity zaznamenané v sedimentech s převahou greigitu se projevují stratigraficky hlouběji než jejich skutečná pozice, což může vytvářet zdánlivé „přízračné polarity“ a vést k systematickému nadhodnocení stáří (obr. 4). Zjištění tohoto časového odstupu může mít zásadní důsledky pro chronostratigrafický rámec mostecké pánve a bylo by vhodné jej prozkoumat v budoucích studiích.

Pro zpřesnění datování doporučujeme v navazujících výzkumech zavést korekční metodiku pro intervaly dominované greigitem. Analýzou poměru greigitu



Obr. 4. Korelace vrtného jádra RL8; zdánlivá („přízračná") magnetická polarita je vyznačena červeně. Upraveno podle Ucara et al. (2024).
Fig. 4. Correlation of the drill core RL8; the ghost magnetic polarity is indicated by a red background. Modified after Ucar et al. (2024).

k magnetitovým magnetofosiliím v celém stratigrafickém sloupci (s využitím FORC diagramů a elektronové mikroskopie) by bylo možné identifikovat úseky, kde je greigit primárním nosičem remanence. V těchto intervalech by bylo vhodné aplikovat kompenzační faktor upravující pozici přechodů polarity směrem nahoru o hodnotu odpovídající zjištěnému zpoždění, a to na základě lokálních rychlostí sedimentace. Korekční metodika by mohla být obzvláště významná pro přesné datování v blízkosti výše zmíněné hranice ***C5Dr.1r***/***C5Dn***, která se shoduje s přechodem mezi holešickými a libkovickými vrstvami. Bez zohlednění zpožděné greigitové magnetizace by načasování této hranice mohlo být posunuto o několik desítek tisíc let, což by ovlivnilo interpretaci toho, jak hydrologie pánve reagovala na regionální a globální klimatické změny. Zahrnutí tohoto faktoru do výpočtů by mohlo dále zvýšit již tak mimořádnou přesnost chronostratigrafického modelu mostecké pánve.

Závěry

Zejména díky propojení magnetostratigrafie a orbitálního ladění došlo v posledních letech ke zpřesnění datování studovaných vrstev až na bezprecedentní časové rozlišení několika tisíc let (Matys Grygar et al. 2019a, 2021). To umožnilo korekci starších údajů (např. Matys Grygar et al. 2014, 2017a) a upřesnilo naše poznatky o paleogeografickém vývoji mostecké pánve (Mach et al. 2014).

Také bylo nalezeno několik časových shod mezi velkými změnami prostředí pánve a inverzemi magnetické polarity (Matys Grygar et al. 2021). Například shoda mezi inverzí ***C5Dr.1r***/***C5Dn*** a litologickými změnami na hranici holešických a libkovických vrstev otevírá podle K. Macha (*nepublikované ústní sdělení*) otázku možných kauzálních vztahů nebo společných příčin. Při absenci přímého mechanismu vlivu geomagnetického pole na klimatické změny by totiž tyto koincidence mohly naznačovat existenci třetího faktoru na pozadí obou jevů, jako jsou globální klimatické fluktuace, významné změny v orbitálních parametrech, masivní vulkanismus v jiných částech planety atd.

Výše uvedená prostorová heterogenita v záznamu magnetochrony ***C5Dr.1n*** mezi centrální a severozápadní částí pánve sice může indikovat diachronní charakter transgrese, ale příčinou by také mohly být rozdílné podmínky pro zachování primárního paleomagnetického signálu. Odhalit faktory kontrolující kvalitu magnetostratigrafického záznamu by mohlo detailní mineralogické a geochemické porovnání těchto oblastí.

Zatímco u nejvyšších partií holešických vrstev a u vrstev libkovických byl získán velmi podrobný magnetostratigrafický záznam, v určitých úrovních lomských a oseckých vrstev nevedl paleomagnetický výzkum k úspěšné identifikaci předpokládaných magnetozón. Příčinou může být absence nosičů primární magnetizace (Matys Grygar et al. 2019a, 2021). Pro problematické intervaly lomských vrstev by však alternativní chronologické ukotvení mohlo poskytnout orbitální datování (Matys Grygar et al. 2017a, 2019a). V některých úsecích mosteckého souvrství však byla korelace cyklostratigrafie s magnetostratigrafickými daty obtížně proveditelná.

Výzkum Ucara et al. (2024) přinesl nové poznatky o horninách mostecké pánve obsahujících magnetické fáze sulfidů železa nesoucí opožděnou chemickou remanentní magnetizaci a prokázal, že v prostředí s omezeným obsahem H_2S je možná koexistence magnetitových magnetofosilií s diagenetickým greigitem. Tyto objevy významně přispívají k pochopení chování paleomagnetického záznamu v sedimentech obsahujících greigit. Poznatky Ucara et al. navíc v budoucnu povedou k dalšímu upřesnění datování a stratigrafického uspořádání mosteckého souvrství. A to je výzvou pro budoucí výzkumy.

Poděkování. Tento článek bychom rádi věnovali významnému českému vědci a zakladateli paleomagnetické laboratoře v Průhonicích Miroslavu Krsovi, který nás opustil 21. května 2023 v požehnaném věku 95 let. Za pečlivé pročtení textu a za cenné připomínky k němu vděčíme recenzentům Karlu Machovi (Severočeské doly, a. s.) a Martinu Mazancovi (Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR). Výzkum byl finančně podpořen projektem 23-06075S Grantové agentury ČR (R. Štorc), projektem 265321 Grantové agentury Univerzity Karlovy (H. Ucar) a výzkumným záměrem RVO67985831 Geologického ústavu Akademie věd ČR, v. v. i. Průzkumné geologické vrty byly financovány společnostmi Severočeské doly, a. s., Diamo, s. p., a Seven, a. s.

Literatura

Hilgen, F. J. – Lourens, L. J. – Van Dam, J.A. – Beu, A. G. – Boyes, A. F. – Cooper, R. A. – Krijgsman, W. – Ogg, J. G. – Piller, W. E. – Wilson, D. S. (2012): Chapter 29 – The Neogene Period. In: Gradstein, F. M. – Ogg, J. G. – Schmitz, M. D. – Ogg, G. M., ed.: The Geologic Time Scale, 923–978. – Elsevier.

Kochhann, K. G. D. – Holbourn, A. – Kuhnt, W. – Channell, J. E. T. – Lyle, M. – Shackford, J. K. – Wilkens, R. H. – Andersen, N. (2016): Eccentricity pacing of eastern equatorial Pacific carbonate dissolution cycles during the Miocene Climatic Optimum. – Paleoceanography 31, 1176–1192.

Krs, M. – Krsová, M. – Pruner, P. – Zeman, A. – Novák, F. – Jansa, J. (1990): A petromagnetic study of Miocene rocks bearing micro-organic material and the magnetic mineral greigite (Sokolov and Cheb basins, Czechoslovakia). – Phys. Earth Planet. Inter. 63 (1–2), 98–112.

Krs, M. – Krsová, M. – Pruner, P. – Kouklíková, L. (1991): On the detailed magnetostratigraphy of greigite – (Smythite) mineralization, Sokolov Brown-Coal Basin, bohemia. – Stud. Geophys. Geod. 35 (4), 267–284.

Krs, M. – Novák, F. – Krsová, M. – Pruner, P. – Kouklíková, L. – Jansa, J. (1992): Magnetic properties and metastability of greigite-smythite mineralization in brown-coal basins of the Krušné hory Piedmont, Bohemia. – Phys. Earth Planet. Inter. 70, 273–287.

Krs, M. – Novák, F. – Krsová, M. – Pruner, P. – Jansa, J. (1993): Magnetic properties, selfreversal remanence and thermal alteration products of smythite. – Stud. Geophys. Geod. 37, 382–400.

Mach, K. – Teodoridis, V. – Matys Grygar, T. – Kvaček, Z. – Suhr, P. – Standke, G. (2014): An evaluation of palaeogeography and palaeoecology in the Most Basin (Czech Republic) and Saxony (Germany) from the late Oligocene to the early Miocene. – N. Jb. Geol. Paläont. (Abh.) 272, 1, 13–45.

Mach, K. – Rapprich, V. – Faměra, M. – Havelcová, M. – Matys Grygar, T. – Novotný, T. – Řehoř, M. – Erban Kochergina, Y. V. (2021): Crandallite-rich beds of the Libkovice Member, Most Basin, Czech Republic: climatic extremes or paleogeographic changes at the onset of the Miocene Climatic Optimum? – Geol. Acta. 19, 1–29.

Matys Grygar, T. – Mach, K. (2013a): Chemostratigrafie miocenních sedimentů mostecké pánve (Chemostratigraphy of Miocene sediments in Most Basin). – Zpr. geol. Výzk. v Roce 2012, 26–29.

Matys Grygar, T. – Mach, K. (2013b): Regional chemostratigraphic key horizons in the macrofossil-barren siliciclastic lower Miocene lacustrine sediments (Most Basin, Eger Graben, Czech Republic). – Bull. Geosci. 88, 3, 557–571.

Matys Grygar, T. – Mach, K. – Schnabl, P. – Pruner, P. – Laurin, J. – Martinez, M. (2014): A lacustrine record of the early stage of the Miocene Climatic Optimum in Central Europe from the Most Basin, Ohře (Eger) Graben, Czech Republic. – Geol. Mag. 151 (6), 1013–1033.

Matys Grygar, T. – Hošek, M. – Mach, K. – Schnabl, P. – Martinez, M. (2017a): Climatic instability before the Miocene Climatic Optimum reflected in a Central European lacustrine record from the Most Basin in the Czech Republic. – Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol. 485, 930–945.

Matys Grygar, T. – Mach, K. – Hošek, M. – Schnabl, P. – Martinez, M. – Koubová, M. (2017b): Early stages of clastic deposition in the Most Basin (Ohře rift, Czech Republic, early Miocene): timing and possible controls. – Bull. Geosci. 92, 337–355.

Matys Grygar, T. – Mach, K. – Schnabl, P. – Martinez, M. – Zeeden, C. (2019a): Orbital forcing and abrupt events in a continental weathering proxy from central Europe (Most Basin, Czech Republic, 17.7–15.9 Ma) recorded beginning of the Miocene Climatic Optimum. – Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol. 514, 423–440.

Matys Grygar, T. – Mach, K. – Martinez, M. (2019b): Checklist for the use of potassium concentrations in siliciclastic sediments as paleoenvironmental archives. – Sediment. Geol. 382, 75–84.

Matys Grygar, T. – Mach, K. – Koubová, M. – Martinez, M. – Hron, K. – Fačevicová, K. (2021): Beginning of the Miocene Climatic Optimum in Central Europe in sediment archive of the Most Basin, Czech Republic. – Bull. Geosci. 96, 1, 61–81.

Novotný, T. – Teodoridis, V. – Kvaček, Z. – Váňa, J. – Mach, K. (2021): Nová flóra z libkovických vrstev v lomu Libouš (sp. miocén, mostecká pánev). – Zpr. geol. Výzk. 54, 1, 63–70.

Ogg, J. G. (2020): Chapter 5 – Geomagnetic polarity time scale. In: Gradstein, F. M. – Ogg, J. G. – Schmitz, M. D. – Ogg, G. M., ed.: Geologic Time Scale 2020, 159–192. – Elsevier.

Ucar, H. – Kletetschka, G. – Egli, R. – Mach, K. – Petronis, M. S. – Grison, H. – Scheidt, S. – Schnabl, P. – Kdýr, Š. (2024): Enigmatic mixture of magnetite magnetofossils and diagenetic greigite as the magnetic carriers of the Early Miocene lacustrine sediments from the Most Basin in Central Europe. – Phys. Earth Planet. Inter. 353, 1–22.