Andreeva et al. 2007). Naproti tomu jsme v apatitech okolních nelsonitů zaznamenali unikátní stavby, které jednoznačně indikují pozdější intenzivní interakci silikátové a karbonatitové taveniny (obr. 5). Apatity nelsonitů byly během svého růstu několikrát korodovány karbonatitovými fluidy za vzniku nepravidelných kalcit-bastnäsitových nebo kalcit-monazitových partií a zón. Obdobné stavby byly nově popsané z karbonatitů z Uzbekistánu (Moore et al. 2009).

Přítomnost vápenato-alkalických lamprofyrů společně s nelsonity a karbonatity ukazuje na důležitou interakci metasomatizovaného (flogopit-klinopyroxen-apatit) litosférického a na CO_2 bohatého astenosférického pláště při genezi riftové vulkano-plutonické asociace Mushugai Khuduk.

Poděkování. Za recenzní posouzení příspěvku autoři děkují F. Holubovi, P. Hanžlovi a V. Kachlíkovi.

Literatura

ANDREEVA, I. A. – KOVALENKO, V. I. – NAUMOV, V. B. (2007): Silicate-salt (sulfate) liquid immiscibility: a study of melt inclusions in minerals of the Mushugai-Khuduk carbonatite-bearing complex (southern Mongolia). – Acta petrol. sin. 23, 73–82.

AOKI, K. – SHIBA, I. (1973): Pyroxenes from lherzolite inclusions of Itinome-gata, Japan – Lithos, 6, 41–51.

BADARCH, G. – CUNNINGHAM, W. D. – WINDLEY, B. F. (2002): A new terrane subdivision for Mongolia: implications for the Phanerozoic crustal growth of Central Asia. – J. Asian Earth Sci. 21, 87–110.

CARMICHAEL, I. S. E. – LANGE, R. A. – LUHR, J. F. (1996): Quaternary minettes and associated volcanic rocks of Mascota, western Mexico: a consequence of plate extension above a subduction modified mantle wedge. – Contr. Mineral. Petrology 124, 302–333.

KYNICKÝ, J. (2006): Karbonatity jižního Mongolska. Disert. práce, 181 s.– MS Lesn. dřev. fak. Mendel. univ. v Brně.

LIÉGEOIS, J. P. – NAVEZ, J. – HERTOGEN, J. – BLACK, R. (1998): Contrasting origin of post-collisional high-K calc-alkaline and shoshonitic versus alkaline and peralkaline granitoids. The use of sliding normalization. – Lithos, 45, 1–28.

MITCHELL, R. H. ed. (1996): Undersaturated alkaline rocks: mineralogy, petrogenesis and economic potential. – Mineral. Assoc. Canada, Short Course Ser., Winnipeg, Manitoba, 321 s.

MOORE, K. R. – WALL, F. – DIVAEV, F. K. – SAVATENKOV, V. M. (2009): Mingling of carbonate and silicate magmas under turbulent flow conditions: Evidence from rock textures and mineral chemistry in sub-volcanic carbonatite dykes, Chagatai, Uzbekistan. – Lithos, 110, 65–82.

SAMOILOV, V. S. – KOVALENKO, V. I. (1983): Komplexy ščeločnych porod i karbonatitov Mongolii. – Nauka 35, 196 s.

VICHI, G. – STOPPA, F. – WALL, F. (2005): The carbonate fraction in carbonatitic Italian lamprophyres. – Lithos 85, 154–170.

WOOLLEY, A. R. – KJARSGAARD, B. A. (2008): Paragenetic types of carbonatites as indicated by the diversity and relative abundances of associated silicate rocks: evidence from a global database. – Canad. Mineralogist 46, 741–752.

YARMOLYUK, V. V. – KOVALENKO, V. I. – KOZAKOV, I. K. – SAL'NIKOVA, E. B. – BUBÁKOVA, E. V. – KOVACH, V. P. – KOZLOVSKY, A. M. – KOTOV, A. B. – LEBEDEV, V. I. – EENJIN, G. – FUGZAN, M. M. (2008): The Age of the Khangai Batholith and the Problem of Batholith Formation in Central Asia. – Doklady Earth Sci. 423, 8, 1223–1228.

ZENKOVIM, V. (1970): Geomorfologija i hydrogeologija južnoj Mongolii. – Izd. Akad. Nauk SSSR. Ser. Geol. 6, 78–96.

Rozšíření a degradace permafrostu ve vybraných oblastech Mongolska

Distribution and degradation of permafrost in selected areas of Mongolia

JINDŘICH KYNICKÝ [1] – RADKA BARTOŠOVÁ [1] – HANA CIHLÁŘOVÁ [1] – MICHAELA KRMÍČKOVÁ [2] – LUKÁŠ KRMÍČEK [3]

[1] *Ústav geologie a pedologie, Lesnická a dřevařská fakulta, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Zemědělská 3, 613 00 Brno*
[2] *Ústav věd o Zemi a životním prostředí, Vysoká škola Karla Engliše, a. s., Šujanovo nám. 1, 602 00 Brno*
[3] *Ústav geologických věd, Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita, Kotlářská 2, 611 37 Brno*

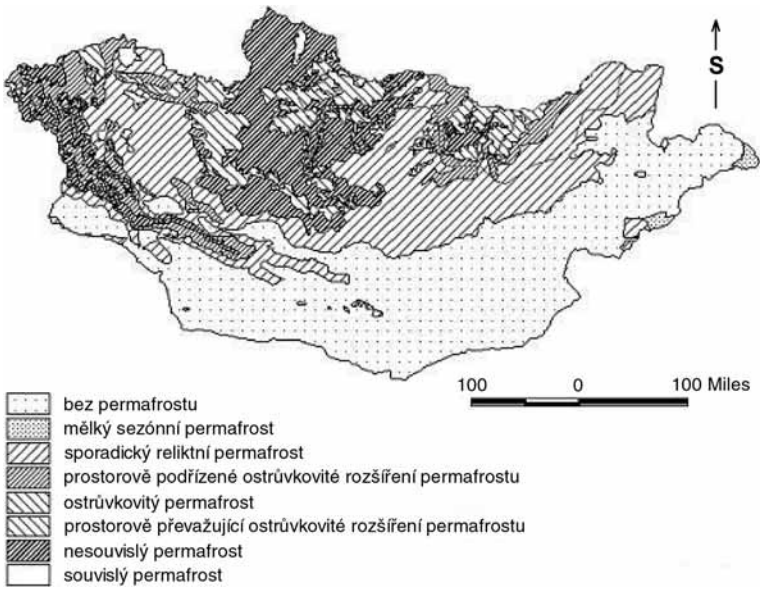
Key words: permafrost, degradation, climatic change, Mongolia, Quaternary

Abstract: Recent extension of the permafrost area in the Mongolia reaches nearly one-half of this country. The lower limit of mountain permafrost is generally almost unchanged since the last glaciation. This observation rests in the direct contrast to the significant changes in mountain permafrost at the territory of Northern America and Europe. Consequently, there is an important finding that the permafrost in the Mongolia is less sensitive to local warming and/or aridisation, however exceptions exists. Within the Altai, Khangai and partly in the Khentia Mts. noticeable degradation of permafrost during the past 50 years was observed. It is highly probable that influence of desertification, global warming and more frequent occurrence of floods in connection with the melting of permafrost in Mongolia will be continually increased during the 21st century. The most important impact linked with melting of permafrost in future will be connected with degradation of water sources. This represents potentially risk for the whole Mongolia.

Dlouhodobě zmrzlá půda, běžně označovaná také anglickým termínem permafrost, je promrzlá půda či hornina, která ani v létě (kromě povrchové činné vrstvy) nerozmrzá. Je to nejsvrchnější část litosféry, jež má po dobu nejméně dvou let stálou teplotu pod bodem mrazu. Mocnost permafrostu se může pohybovat od několika centimetrů až po 1500 m. Permafrost vzniká v oblastech pevnin, kde teplota v zimních měsících klesá pod bod mrazu a zmrzlá půda v létě zcela neroztává. Jsou to oblasti, které mají tzv. zápornou tepelnou bilanci. Vrstvu, která v létě roztaje a v zimě znovu zmrzne, nazýváme ***činnou vrstvou***. Její mocnost závisí na klimatických poměrech. V rašeliništích je mocná pouze 10–20 cm, pod tundrou 30–50 cm a v suchých štěrcích Mongolska 2–4 m, výjimečně až 10 m. V činné vrstvě intenzivně působí kryogenní pochody, tj. procesy související s fázovými změnami vody při zmrzání a tání hornin. V hloubce okolo 15 m mívá permafrost teplotu blízkou

průměrné roční teplotě na povrchu a během roku se nemění.

Ačkoli již Sodnom a Losev (1976) shrnuli hlavní rysy permafrostu v Mongolsku a nastínili možná rizika i budoucí trendy jeho degradace, dosud neproběhlo komplexní digitalizování mapových soustav a jejich propojení s aplikacemi GIS. Tento příspěvek přináší informaci o výzkumu aktuálního rozšíření permafrostu jak na území Mongolska, tak i v přilehlých oblastech Altaid, zasahujících do Ruska a Číny.



Obr. 1. Schematická mapka distribuce permafrostu na území Mongolska (upraveno podle Tarasova et al. 2000).

Metodika

Terénní práce ve vybraných oblastech s výskytem permafrostu na území Mongolska probíhaly zejména v období mezi lety 2003 a 2009, a to za účelem studie distribuce a degradace permafrostu, půd a lesů ve vybraných pohořích a pánvích situovaných zejména v severním Mongolsku. Měření distribuce permafrostu, jakož i postupu aridizace a míry degradace permafrostu v daných oblastech za pomocí sond a srovnání výsledků s publikovanými informacemi umožnilo za použití GIS aplikací (Houška – Kynický 2004, Kynický 2006) výsledky podrobně zpracovat. Detailní průzkum probíhá již téměř 10 let v horách Khentii za pomoci měření teploty vzduchu, půdy, srážek, půdní vlhkosti a také hladiny podzemních vod.

Výsledky a diskuse

Rozšíření permafrostu

Aktuální rozšíření permafrostu na území Mongolska se blíží 50 % celkové rozlohy země (viz obr. 1). Permafrost se v Mongolsku nachází hlavně v oblastech Khubsgul a Orkhon-Selenge, v pohořích Altaj, Khangai, Khentii a částečně také Hutag Ull Ord (Houška – Kynický 2004, Kynický et al. 2009), viz tab. 1. Vývoj a distribuce permafrostu v Mongolsku závisí především na klimatických, geografických, geologických, hydrologických a povrchových podmínkách. Zeměpisná šířka je druhý nejdůležitější faktor, který ovlivňuje rozložení průměrné roční teploty vzduchu (MAAT) i vlastního permafrostu (MAGT) a ovlivňuje distribuci a vývoj zejména horského permafrostu. Se zvyšováním MAAT a MAGT klesá směrem na J stabilita (tab. 2) i mocnost permafrostu ze 400 m na 200 m v pohoří Khentii, z 270 m na 150 m v oblasti Khubsgul, z 320 m na 260 m v pohoří Khangai, z 210 m na 150 m v pohoří Hutag Ull Ord a z 350 m na 240 m v pohoří Altaj.

Vývoj permafrostu v kvartéru

V průběhu kvartéru probíhaly na území Mongolska rozsáhlé změny v rozšíření permafrostu (Prokopenko et al. 2007). V období spodního pleistocénu permafrost existoval pouze ve vysokých horách (Marchenko et al. 2007). V období mezi 0,8 a 0,6 Ma, které pokrývá přelom spodního a středního pleistocénu, došlo k extenzivnímu vývoji permafrostu, a to zejména v oblastech severního Mongolska. Mrazové klíny, které se utvořily během nejchladnějšího období svrchního pleistocénu, byly objeveny na mnoha místech v oblasti Khubsqul a v Khentii (Kynický 2006). Plocha permafrostu se během posledního ledového maxima (32–16 ka) odhaduje na maximálně 1×10^6 km^2 (Kynický 2006). Během teplejších dob meziledových permafrost s největší pravděpodobností výrazně ustoupil a vyskytoval se pouze v nejvyšších oblastech (např. pohoří Altaj). V teplém období holocénu (8,8–3,4 ka), kdy MAAT byla přibližně o 2–5 °C vyšší než během posledního ledového maxima (Prokopenko et al. 2007), docházelo k degradaci permafrostu. Indikátorem počátku oteplování byl vznik písčitých klínů. Nástup oteplení předurčil vývoj řady rašelinišť a fosilních půd (Kynický 2006). Nejteplejší období ve střední Asii bylo nejspíše mezi 8,5–5,2 ka, kdy MAAT byla ca o 3–5 °C vyšší (Marchenko et al. 2007). I přes výraznou aridizaci se však dolní hranice horského permafrostu zvyšuje velmi pomalu a ostrovy permafrostu nacházíme i v jižnějších zeměpisných šířkách. Permafrost v Mongolsku tak je relikt, který jen velmi pomalu degraduje.

Citlivost permafrostu v Mongolsku během klimatických změn

Jižní limity distribuce permafrostu od poslední doby ledové ustoupily severně o 23–24° v severní Evropě (Harris et al. 2009) a o 16–18° v Severní Americe (Gorham et al. 2007). V Mongolsku byl však zaznamenaný ústup maximálně o 5–7° (Prokopenko et al. 2007, Kynický et al. 2009). Tento rozdíl je spojován především s kombinovaným vlivem silných a trvalých inverzních vrstev v atmosféře až do 1500 m, nízkým tlakem a geografií sibiřsko-mongolské oblasti. Například v západním Mongolsku (pohoří Altaj)

Tabulka 1. Charakteristické rysy permafrostu na území Mongolska

typ permafrostu	subtyp	region	pokryvnost (km^2)	limit (s.š.)	MAAT (°C)	MAGT (°C)
nížinný	souvislý		ca 9000		více než –4	ca –2 až 1,4
	nesouvislý		100 000–120 000		ca –2 až 4	ca –2 až 0,5
	ostrůvkovitý a sporadický		450 000–540 000		ca –2 až 0	ca –1 až 0
horský		Altaj	ca 78 000	2300–2700	–5,2	až –4
		Hubsugul	ca 13 000	2200–2300	–3,4	až –2,5
		Khangai	ca 25 000	2200–2600	–2,6	až –1,8
		Khentii	ca 17 000	2200–2500	–2,8	až –2,9
		Hutag Ull Ord	ca 5000	2100–2300	–2,1	až –1,1

Tabulka 2. Stabilita a zastoupení hlavních typů permafrostu na území Mongolska

stabilita permafrostu	MAGT (°C)	mocnost permafrostu (m)	zastoupení typu permafrostu (%)	
			nížinný	horský
velmi stabilní	–5	nad 1000	ojedinělý	ojedinělý
stabilní	od –5 do –2,5	50–100	20–30	50–60
málo stabilní	od –2,5 do –0,5	20–50	20–30	20–30
nestabilní	od –0,5 do 0	0–20	ca 50	ca 20

Tabulka 3. Reprezentativní data pro permafrost na území pohoří Khentii

hloubka (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	30	40	50
datace a hodnoty MAGT (°C)													
1.6.2003	–0,1	–0,2	–0,3	–0,3	–0,5	–0,6	–0,7	–0,7	–1,1	n. m.	n. m.	n. m.	n. m.
1.6.2004	–0,2	–0,3	–0,3	–0,3	–0,5	–0,6	–0,7	–0,7	–1,1	–1,3	–1,6	–1,8	–1,6
1.6.2005	–0,2	–0,3	–0,3	–0,4	–0,6	–0,6	–0,7	–0,8	–1,1	–1,4	–1,7	–1,9	–1,7
1.6.2006	–0,2	–0,3	–0,3	–0,4	–0,6	–0,6	–0,7	–0,7	n. m.	n. m.	n. m.	n. m.	n. m.
1.6.2007	–0,1	–0,2	–0,2	–0,3	–0,5	–0,6	–0,6	–0,7	–0,9	–1,3	–1,6	–1,8	–1,6
1.6.2008	–0,1	–0,1	–0,2	–0,3	–0,5	–0,6	–0,6	–0,7	–0,9	–1,3	–1,6	–1,8	–1,6
1.6.2009	–0,1	–0,2	–0,2	–0,3	–0,5	–0,6	–0,6	–0,7	–0,9	–1,2	–1,5	–1,8	–1,6

klesl spodní výškový limit horského permafrostu maximálně o stovky metrů (Sodnom – Losev 1976). Jinými slovy, periglaciální prostředí v Mongolsku je méně citlivé na změny klimatu.

Nedávné degradace permafrostu

Náš výzkum permafrostu ve vztahu ke globálnímu oteplování naznačuje, že již zvýšení MAAT o 0,4–0,5 °C během posledních padesáti let zrychlilo degradaci permafrostu, která bude s velkou pravděpodobností i nadále pokračovat (Kynický et al. 2009). Sledování a výzkum pásma lesního porostu v Khubsgul a Khentii indikuje zvýšení MAAT o přibližně 0,4–0,5 °C v sezónně zamrzlé půdě i v zónách permafrostu. Dále je možné hovořit o zvýšení teploty vzduchu o přibližně 0,2–0,3 °C v oblastech kontinuálního permafrostu. V nestabilních reliktních permafrostových zónách s MAAT -0,5 až 0 °C dochází i nadále k oteplování permafrostu. V oblasti pohoří Khentii je možné odhadnout zvýšení MAAT o nejméně 1 °C za posledních 40 let. Tento fakt indikují i měřené nízké hodnoty MAGT (tab. 3). V této oblasti jižní hranice euroasijského permafrostu ustoupila skutečná hranice permafrostu průměrně o 25 km severně a posun se zrychluje. Předpokládá se, že pokud se MAAT zvýší o další 1 °C, dojde k ústupu permafrostu přibližně o 80–200 km k severu (Prokopenko et al. 2007).

Recentní a nedávné klimatické události (humidizace versus aridizace)

Střídání období sucha/tepla s chladným/vlhkým jsou všeobecně typické pro spodní holocén. Geneticky mnohem

důležitější jsou však změny optima teplo/vlhko a chladno/sucho. Zatím nebyly pozorovány žádné dlouhodobé vztahy mezi střídáním období vlhka a silných letních asijských monzunů (Prokopenko et al. 2007). Degradace permafrostu neindikuje vznik dalších míst pro vegetaci. Z tohoto důvodu se zonální ekosystém ve v. části Sibiře a Mongolska pravděpodobně nachází již od pozdně glaciálního období v téměř totožných zónách, a to i přesto, že dochází k výrazným změnám klimatu (Tarasov et al. 2000). Na druhou stranu se prostředí řady regionů Mongolska stává čím dál tím více náchylné k postupující desertifikaci (Houška – Kynický 2004, Bajer et al. 2008).

Závěr

Periglaciální prostředí v Mongolsku je méně citlivé na změny klimatu, než je tomu dnes například v obdobných oblastech Evropy a Severní Ameriky. Degradace mongolského permafrostu je proto zatím v globálním kontextu relativně pomalá. Většina oblastí permafrostu v Mongolsku je nyní reliktem chladného klimatu, nejrychleji degradujícím právě v průběhu posledních padesáti let. Statisticky doložitelné oteplení již od roku 1970 a ještě rychleji od roku 2000 je alarmující. Nejvýznamnější dopad degradace permafrostu v Mongolsku bude na vodní zdroje. Ochrana chladných oblastí a vodních zdrojů se tak do budoucna stane klíčovým prvkem pro ochranu životního prostředí v Mongolsku.

Poděkování. Za podnětné připomínky k původní práci děkujeme recenzentům a konzultantům článku, zejména pak prof. J. Demkovi, Dr. K. Kirchnerovi, Dr. M. Ivanovovi, Dr. Yo. Majigsuren a Dr. A. Rečnikovi. Příspěvek byl podpořen v rámci interního grantu Mendelu v Brně (Procesy v půdě), grantu Anchor House Inc. (ARC 113) a grantu Chinese National Science Foundation (č. 40773021).

Literatura

BAJER, A. – KYNICKÝ, J. – SAMEC, P. (2008): Možnosti ochrany přírodního a nerostného bohatství Mongolska. In: KYNICKÝ, J. – BAJER, A.: Sborník příspěvků konference Mongolia 2008, 6–11. – Mendel. zeměděl. lesn. univ. Brno.

GORHAM, E. – LEHMAN, C. – DYKE, A. – JANSSENS, J. – DYKE, L. (2007): Temporal and spatial aspects of peatland initiation following deglaciation in North America. – Quat. Sci. Rev. 26, 3–4, 300–311.

HARRIS, CH. – ARENSON, U. L. – CHRISTIANSEN, H. H. et al. (2009): Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses. – Earth-Sci. Rev. 92, 3–4, 117–171.

HOUŠKA, J. – KYNICKÝ, J. (2004): Možnosti aplikace dálkového průzkumu Země při řešení otázek desertifikace v Mongolsku. In: SAMEC, P. – KYNICKÝ, J. – JAROŠ, O.: Scientific exploration of Mongolia, 73–77. – Mendel. zeměděl. lesn. univ. Brno.

KYNICKÝ, J. (2006): Permafrost na území Mongolska. In: SAMEC, P. – KYNICKÝ, J.: Hlavní výsledky průzkumu území Mongolska v projektu Mongolsko 2000–2005: shrnutí, hodnocení a interpretace (II), 93–94. – Mendel. zeměděl. lesn. univ. Brno.

KYNICKÝ, J. – BRTNICKÝ, M. – VAVŘÍČEK, D. – BARTOŠOVÁ, R. – MAJIGSUREN, YO. (2009): Permafrost and climatic change in Mongolia. In: PRIBULLOVÁ, A. – BIČÁROVÁ, S. Sustainable development and bioclimate. 1. vyd. Stará Lesná, 34–35. Geophys. Inst. Slovak Acad. Sci. – Slovak Bioclimat. Soc. Slovak Acad. Sci. ISBN 978-80-9004-501-9.

MARCHENKO, S. S. – GORBUNOV, A. P. – ROMANOVSKY, V. E.(2007): Permafrost warming in the Tien Shan mountains, Central Asia. – Global Planet. Change 56, 311–327.

PROKOPENKO, A. A. – KHURSEVICH, G. K. – BEZRUKOVA, E. V. – KUZMIN, M. I. – BOES, X. – WILLIAMS, D. F. – FEDENYA, S. A. – KULAGINA, N. V. – LETUNOVA, P. P. – ABZAEVA, A. (2007): Paleoenvironmental proxy records from Lake Hovsgol, Mongolia, and a synthesis of Holocene climate change in the Lake Baikal watershed. – Quat. Res. 68, 2–17.

SODNOM, N. – LOSEV, N. Ph. (1976): Environmental condition and resources in surrounding area of Khubsgul, Mongolia. – Moskva (v ruštině).

TARASOV, P. E. – VOLKOVA, V. S. – WEBB, T. – GUIOT, J. – ANDREEV, A. A. – BEZUSKO, L. G. – BEZUSKO, T. V. – BYKOVA, G. V. – DOROFEYUK, N. I. – KVAVADZE, E. V. – OSIPOVA, I. M. – PANOVA, N. K. – SEVASTYANOV, D. V. (2000): Last glacial maximum biomes reconstructed from pollen and plant macrofossil data from northern Eurasia. – J. Biogeogr. 27, 609–620.