

INAA a petrologické studium pískovců z khmerských chrámů v Angkoru

Kučera Jan^{1,2}, Novák Jiří K.³, Kranda Karel^{1,2}, Poncar Jaroslav⁴, Krausová Ivana¹, Soukal Ladislav¹

¹Ústav jaderné fyziky AVČR, v. v. i., Řež u Prahy

²Centrum výzkumu Řež, s.r.o., Řež u Prahy

³Geologický ústav AVČR, v. v. i., Praha

⁴Fachhochschule Köln, Kolín nad Rýnem, Německo

Khmerské chrámy v Angkoru v Kambodži byly postaveny v době největšího rozmachu khmerské říše v 9.-13. století a v r. 1992 byly zařazeny na seznam světového kulturního dědictví. Hlavním stavebním materiálem byl, kromě cihel a lateritu, pískovec. Ačkoliv chronologie angkorských chrámů je dobře známa^{1,2}, velmi málo se ví o původu pískovce a jeho petrologii. Stavebních bloky z šedého až žlutavě hnědého pískovce na více než 40 hlavních chrámech jsou tvořeny křemenným arkózovitým pískovcem, jen na několika chrámech byl použit červený křemenný pískovec a drobový živcový pískovec. Znalost prvkového složení pískovce, včetně jeho petrologických charakteristik, by přispěla k lepšímu porozumění metod stavby chrámů v Angoru a procesů degradace pískovce. Uchida a spol.^{3,4} se pokoušeli zjistit souvislost mezi chemickým složením pískovcových bloků a dobou stavby jednotlivých chrámů, avšak nenašli ji. Cílem této práce bylo znovu vyšetřit chemické složení a petrologii angkorských pískovců z 21 chrámů s použitím dokonalejších metod odběru vzorků a dokonalejšími analytickými a petrologickými metodami a zjistit je-li prvkové či mineralogické složení charakteristické pro jednotlivé styly architektury a stavební období khmerských chrámů v Angkoru. Nedílnou součástí této práce byl i odběr vzorků ze starých lomů, z nichž byl získáván pískovec pro stavbu khmerských chrámů. Jejich poloha byla jen přibližně zmíněna v literatuře⁵, ale nebyla přesně známa.

Experimentální část

Odběr vzorků a jejich příprava k analýze

Vzorky pískovce ze stavebních bloků chrámů byly odebírány jádrovým vrtákem s diamantovou korunkou o vnějším průměru 12 mm. Vrtná jádra byla 5-7 cm dlouhá. Části jader vybrané pro analýzu prvkového složení o hmotnosti ~ 2 g byly rozdrčeny v lisovací hlavici z cementované oceli a homogenizovány a umlety na velikost zrn menší než 200 mesh v achátovém kulovém mlýnu (Pulverizette 5, Fritsch). K analýze bylo použito 100-200 mg jemně umletého a homogenizovaného pískovce. K mineralogickým a petrologickým rozborům byly z jader připraveny leštěné výbrusy dlouhé 30 mm. Po nalezení historických lomů pískovce v buši vzdáleném cca 50 km od hlavní oblasti chrámů v Angkoru, v blízkosti chrámu Beng Melea, v nich byly odebrány vzorky o hmotnosti 250-500 g v geologii obvyklým způsobem.

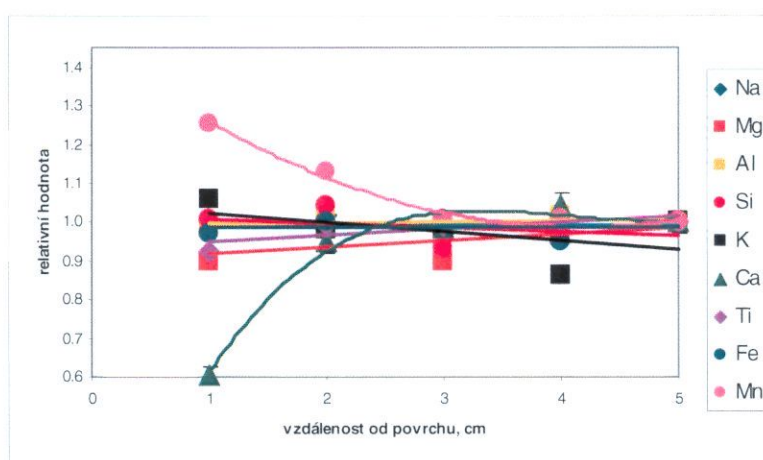
Analytické metody

Instrumentální neutronová aktivační analýza (INAA): Krátkodobé (1 min.) a dlouhodobé (2 hod.) ozařování bylo provedeno v reaktoru LVR-15 Ústavu jaderného výzkumu Řež, a.s. hustotou toku neutronů $5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Aktivita indukovaných radionuklidů byla měřena polovodičovými koaxiálními detektory ve spojení s gama-spektrometrickým systémem Canberra Genie 2000. Bylo použito několik režimů doby ozařování, vymírání a měření tak, aby bylo možno stanovit co největší počet prvků a nízkou nejistotou⁶⁻⁷. Nízké energie záření gama radionuklidů ¹⁵²Eu, ¹⁵⁹Gd, ¹⁷⁰Tm a ¹⁸²Ta byly měřeny planárním HPGe detektorem⁸.

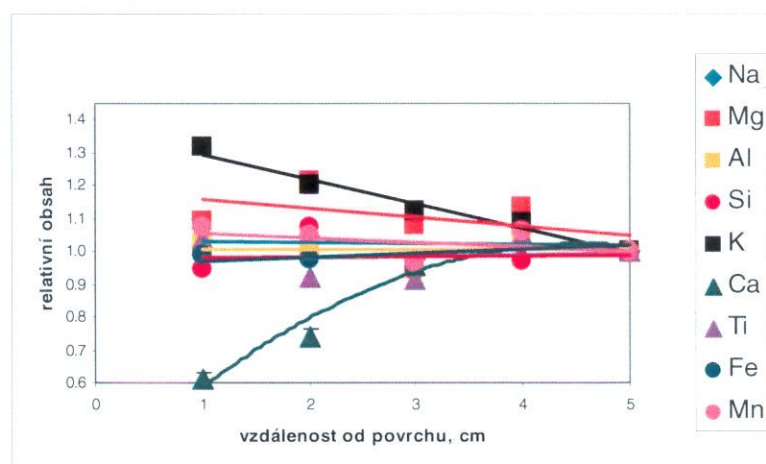
Petrologická a mineralogická analýza: Byla použita optická mikroskopie, rentgenová difraktografie (Philips X'pert) a lokální analýza elektronovou mikrosondou (CAMECA SX100).

Výsledky a diskuse

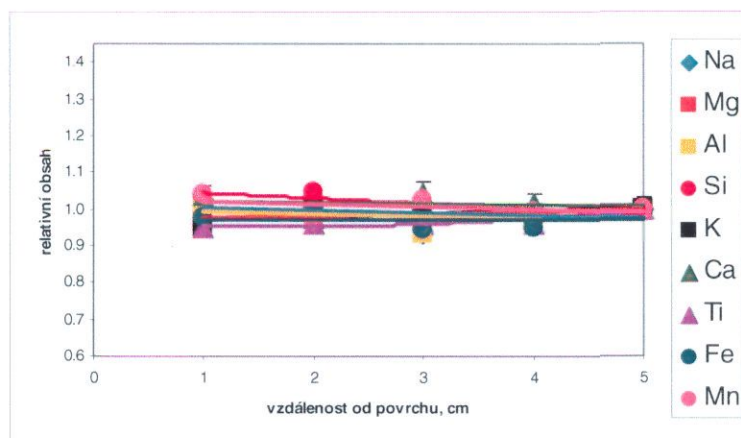
Ve vzorcích pískovce z jednotlivých chrámů postavených v 8 různých architektonických stylech a obdobích (v letech 875-1230 n.l.) bylo metodou INAA stanoveno 35 prvků (Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Zn, Rb, Sr, Zr, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, Th a U). Každý vzorek byl analyzován z duplikátních navážek, homogenita analytických podílů byla příležitostně testována analýzou 3-4 replikátů. V předběžných analýzách byla studována distribuce prvků ve vrtných jádrech v závislosti na vzdálenosti od povrchu stavebních pískovcových bloků. Na obr. 1 až 3 jsou uvedeny relativní hodnoty koncentrací některých makrosložek v sekcích vrtných jader o délce 1 cm vzdálených od povrchu pískovcového bloku 1-5 cm. Relativní hodnoty byly normovány na sekci jádra nejvzdálenější od povrchu.



Obr. 1. Relativní obsahy prvků v závislosti na vzdálenosti od povrchu pískovcového bloku z chrámu Batchum (styl Pre Rup z období 944-967 n.l.). Nejistoty hodnot jsou pro jednoduchost uvedeny jen pro Ca



Obr. 2. Relativní obsahy prvků v závislosti na vzdálenosti od povrchu pískovcového bloku z chrámu Chau Say Tevoda (styl Angkor Wat z období 1110-1175 n.l.). Nejistoty hodnot jsou pro jednoduchost uvedeny jen pro Ca



Obr. 3. Relativní obsahy prvků v závislosti na vzdálenosti od povrchu pískovcového bloku z nového lomu používaného pro opravu chrámů. Nejistoty hodnot jsou pro jednoduchost uvedeny jen pro Ca

Z obr. 1 a 2 je zřejmé, že vlivem vnějších faktorů, jako např. zvětvování, růst lišejníků a jiných procesů degradace dochází na povrchu pískovcových bloků ke změnám koncentrace některých prvků, včetně makrosložek. Podobná změna prvkového složení není patrná u vzorků vrtného jádra z nového pískovcového bloku (obr. 3.). Závislosti na obr. 1 a 2 však nemají univerzální charakter, na vzorcích z jiných chrámů byly nalezeny jiné trendy prvkového složení. Proto byly pro analýzy zaměřené na porovnání složení pískovce z různých chrámů a studia korelace s dobou jejich stavby použity vzorky vrtných jader vzdálených od povrchu pískovcových bloků 4-5 cm, aby se minimalizoval vliv externích faktorů. Informace o zahrnutí uvedených vlivů na prvkové složení pískovcových bloků z khmerských chrámů v práci Uchidy a spol.^{3,4} nebylo uvedeno.

Petrologická a mineralogická analýza poskytla informace o výskytu 13 minerálů v pískovcových blocích použitých pro stavbu khmerských chrámů v Angkoru. Prvkové ani mineralogické analýzy vzorků z některých chrámů a zejména z historických lomů, z nichž byl pravděpodobně získáván pískovec pro stavbu chrámů nebyly dosud dokončeny. Proto nelze v současné době provést korelační analýzu prvkového a mineralogického složení pískovců použitých pro stavbu khmerských chrámů v Angkoru a zjistit zda-li a jak uvedené parametry souvisejí s dobou stavby a architektonickými styly chrámů. Po dokončení uvedených analýz bude o tomto výzkumu podána další zpráva.

Tato práce byla podpořena projekty RP 17/2006, MSM 2672244501 a IRP AV0Z 10480505 .

1. Freeman M., Jacques C., *Ancient Angkor*, River Books Ltd., Bangkok, 2003.
2. Rooney D., *Angkor*, Odyssey Publications Ltd., Hong Kong, 2004.
3. Uchida E., Ogawa Y., Nakagawa T., *J. Miner. Petr. Econ. Geology*, **93** (1998), 411.
4. Uchida E., Cunin O., Suda C., Ueno A., Nakagawa T., *J. Archaeol. Sci.*, **34** (2007), 924.
5. Delvert J., *Recherches sur l'érosion des grès des monuments d'Angkor*, Bull. EFEO LI-2, 1963, Paris, France, pp. 453-534.
6. Řanda Z., Kučera J., Soukal L., *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **257** (2003) 275.
7. Kučera J., Soukal L., *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **121** (1988) 245.
8. Kučera J., Novák J.K., Kranda K., Poncar J., Krausová I., Soukal L., Cunin O., Lang M., *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **278** (2008) 299.

INAA a petrological study of sandstones from the Khmer temples in Angkor

Kučera Jan^{1,2}, Novák Jiří K.³, Kranda Karel^{1,2}, Poncar Jaroslav⁴, Krausová Ivana¹, Soukal Ladislav¹

¹ Nuclear Physics Institute, Academy of Sciences of the Czech Republic, Řež near Prague, Czech Republic

² Research Centre Řež, Ltd., Řež near Prague, Czech Republic

³ Institute of Geology ASCR, Prague, Czech Republic

⁴ Cologne University of Applied Sciences, Cologne, Germany

INAA was used to determine 35 major, minor and trace elements in sandstone samples taken from building blocks of 21 Khmer temples in Angkor, Cambodia. The sandstone samples were also characterized with conventional optical microscopy, X-ray diffraction analysis and electron microprobe analysis. The aim of this work was to examine the possibility that a particular elemental and/or mineral composition of the building materials is characteristic for a particular architectural style/building period in the history of constructing the Angkor monuments. Preliminary results of this study are presented.