



obr. 3 Vyzvednutý žárový hrob z Modřic s obalem na oddělení výpočetní tomografie. ■

Aplikace výpočetní tomografie (CT) a možnosti 3D rekonstrukcí zobrazovacích technik v archeologii

Martin Hložek, Petr Krupa, Martin Oliva, Libor Balák

1. Úvod

Výpočetní tomografie je perspektivní metoda, kterou lze efektivně aplikovat v rámci řešení specifických problémů v archeologii, antropologii, muzeologii a dějinách umění. Výhodou výpočetní tomografie je možnost nedestruktivního studování archeologických, historických, případně i uměleckých předmětů. Výstupy získané touto metodou nám napomáhají v řešení otázky autentičnosti předmětů, dokumentují současný stav zkoumaných objektů a dále nás informují o použitých výrobních postupech artefaktů.

2. Výpočetní tomografie (CT)

Výpočetní tomografie (computed tomography, computerised tomography) je způsob, jak matematickou rekonstrukcí získat z mnoha sumačních snímků snímek tomografický, tj. příčný řez. Zavedení CT do medicínské praxe přineslo nové diagnostické možnosti a bývá svým významem přirovnáváno k objevu rentgenových paprsků německým fyzikem Wilhelmem Konrádem Röntgenem v roce 1895. Stejně jako RTG i CT se rozšířilo velice rychle a dnes plní velice důležitou funkci při diagnostice v mnoha medicínských oborech (Bruna 1988).

Samotná teorie rekonstrukce tomografického (z řeckého *tomeo* – řezat) řezu z mnoha sumačních snímků byla vypracována Allanem Cormackem již v roce 1963. Vzhledem k náročnosti rekonstrukce na výpočetní sílu však uplynulo takřka deset let, než byl v praxi zkonstruován první použitelný tomograf - EMI Mark I sestavený Godfreyem Hounsfieldem v roce 1972. V roce 1979 byla Cormackovi i Hounsfieldovi udělena Nobelova cena za medicínu. V roce 1986 byl firmou Bio-Imaging Research sestaven první CT skener s kontinuální rotací TCT-900A, který již tehdy byl schopen rekonstruovat 3-4 snímky za vteřinu. Metoda kontinuální rotace (umožněná technologií *slip-ring*) umožnila vývoj revolučního spirálního CT. V roce 1999 pak Toshiba uvedla první tzv. Multi-Slice CT.

Díky aplikaci CT byly řešeny otázky nemoci a zranění egyptských panovníků a způsoby provedení mumifikace.

CT využívá možnosti matematicky rekonstruovat pomocí počítače z mnoha sumačních snímků určité roviny řez v této rovině. Základem je tedy mnoho „klasických“ RTG snímků, ze kterých je rekonstruován výsledný řez. Na rozdíl od klasického RTG však není záření registrováno na film, ale je zachycováno pomocí systému detektorů připojených k počítači. Ten převádí analogový signál na digitální, který dále zpracovává a nakonec jej opět převádí na analogový (výsledný obraz). Stejně jako RTG je i CT zobrazením denzit. Naměřená data (jednotlivé snímky) jsou následně složitými matematickými postupy rekonstruovány do výsledné matice. Ta bývá nejčastěji velikosti 512×512 bodů. Velikost závisí nejen na možnostech přístroje, ale také na požadovaném přínosu vyšetření. Spolu se zvětšováním matice prudce narůstá výpočetní náročnost a také čas nutný k získání dat a tím i radiační zátěž. Také je nutné si uvědomit, že každý pixel v matici nepředstavuje dvourozměrnou jednotku, ale má také svou hloubku danou tloušťkou řezu. Proto se používá označení voxel (volume matrix element). Zvyšování rozlišení matrix bez současného ztenčení řezané vrstvy může přinést jen omezený efekt a často je spíše zdrojem artefaktů (Ferda - Novák - Kreuzberg 2002).

3. Výpočetní tomografie (CT) v archeologii

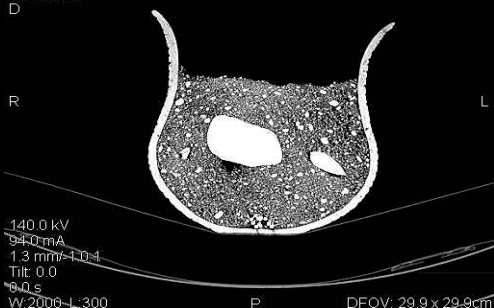
V rámci testování moderních diagnostických metod v archeologii byla navázána spolupráce s Klinikou zobrazovacích metod Fakultní nemocnice u svaté Anny v Brně. V březnu 1993 bylo v této nemocnici zřízeno pracoviště počítačového tomografu

Mx8000
Ex: 30687
KZP
Se: 8460/5
Im: 55/126
Ax: 1922.7
KZP
512 x 512
D

Obr. 1

A

FN U sv. Anny v Brně
KRUPA PETR*1837/03-6
O 540316/2633
Acc: 4284-1837/03-6
2003 Oct 09
Acq Tm: 17:31:10

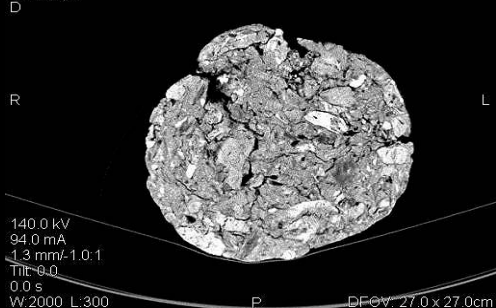


Mx8000
Ex: 30687
HD3
Se: 8463/5
Im: 85/131
Ax: 11480.7
HD3
512 x 512
D

Obr. 2

A

FN U sv. Anny v Brně
KRUPA PETR*1837/03-6
O 540316/2633
Acc: 4284-1837/03-6
2003 Oct 09
Acq Tm: 17:50:31

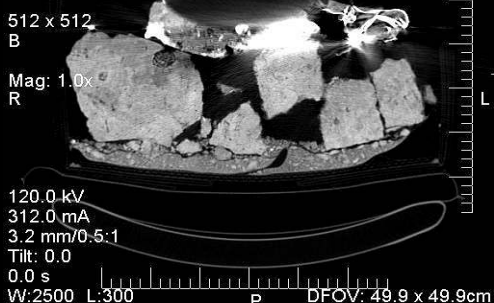


Mx8000
Ex: 27807
Se: 7645/2
Im: 79/338
Ax: S129.3

Obr. 5

A

FN U sv. Anny v Brně
1837/03-2 KRUPA PETR
M 540316/2633
Acc: 4284-1837/03-2
2003 Jun 13
14:37:40

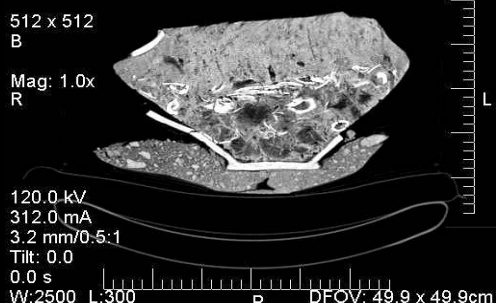


Mx8000
Ex: 27807
Se: 7645/2
Im: 180/338
Ax: S290.9

Obr. 6

A

FN U sv. Anny v Brně
1837/03-2 KRUPA PETR
M 540316/2633
Acc: 4284-1837/03-2
2003 Jun 13
14:37:40

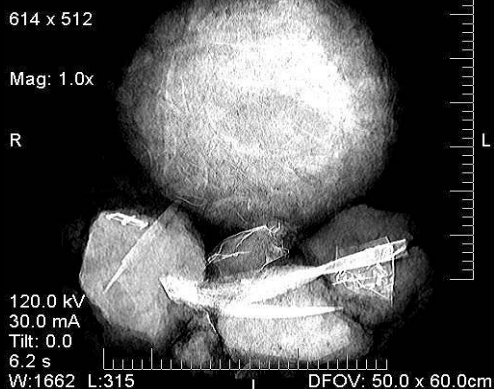


Mx8000
Ex: 27807
Se: 7644/2
Im: 1/3
Cor: 1.5

Obr. 4

S

FN U sv. Anny v Brně
1837/03-2 KRUPA PETR
M 540316/2633
Acc: 4284-1837/03-2
2003 Jun 13
14:37:40



Obr. 1 Testovací objekt - keramická nádoba, do níž byl vložen kamenný sekeromlat, sílexová čepel, kost, kovový předmět, jako zásyp je použita běžná písčitá půda. ■

Obr. 2 Řez menší grafitovou koulí z Těšetic. ■

Obr. 4 Většina milodarů z hrobu se nachází mimo keramickou nádobu a jsou rozptýleny v hlině při okraji nádoby. Při prvotním kolmém RTG náhledu lze identifikovat kopí, nůž, přezku a části plechů bronzových nádob. ■

Obr. 5 Za kovovými předměty a materiály s vyšším atomovým číslem vznikají v důsledku pohlcování RTG záření paprskové artefakty, rušící obraz. ■

Obr. 6 Řezy žárovým pohřbem dokumentují stěny keramické nádoby, ve které lze pozorovat průřezy spálených kostí. ■

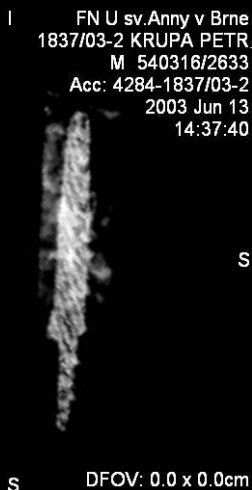
MxView
Ex: 27807 **Obr. 7**

Se: 7645/2
Im: /338
: 0.0

512 x 512

Mag: 1.0x

0.0 kV
0.0 mA
Tilt: 0.0
0.0 s
W:255 L:127



MxView
Ex: 27807 **Obr. 8**

Se: 7645/2
Im: /338
: 0.0

512 x 512

Mag: 1.0x

0.0 kV
0.0 mA
Tilt: 0.0
0.0 s
W:255 L:127



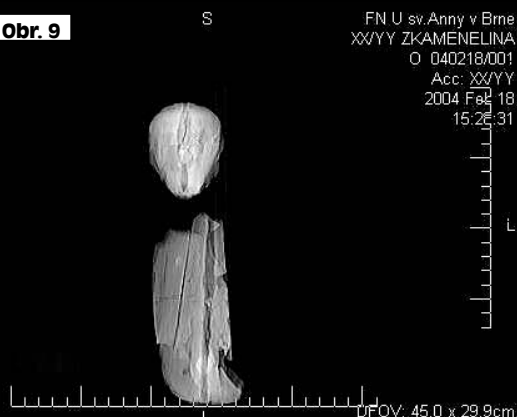
Mx8000
Ex: 34553 **Obr. 9**

Se: 2629/191
Im: 1/6
Cor: 1.5

341 x 512

Mag: 1.0x

120.0 kV
30.0 mA
Tilt: 0.0
3.1 s
W:686 L:657



Obr. 7, 8 Milodary rozptýlené v hlině mimo keramickou nádobu: nůž a přezka vysegmentované z hlíny pomocí 3D rekonstrukce. ■

Obr. 9 Předběžný RTG náhled na hlavu a trup torza sošky muže vyřezané z mamutoviny - nález z Francouzské ulice v Brně. ■

Obr. 10 Řez hlavou plastiky. ■

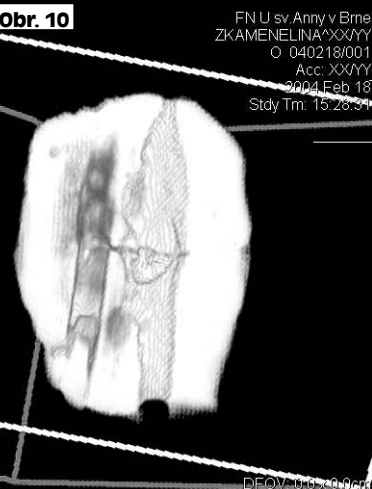
Obr. 11 Řez střední částí hlavy plastiky. ■

MxView
Ex: 34553 **Obr. 10**

Se: 263236/191
Im: 71
: -1.0

512 x 512

0.0 kV
0.0 mA
Tilt: 0.0
0.0 s
W:255 L:127



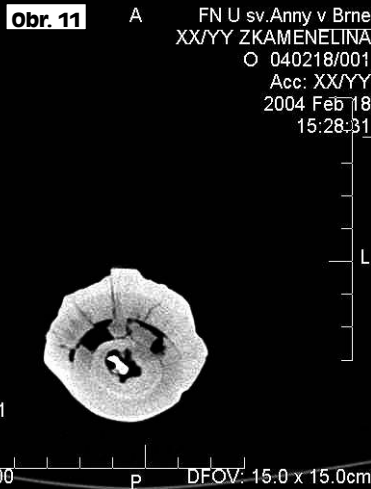
Mx8000
Ex: 34553 **Obr. 11**

Se: 2632/191
Im: 65/124
Ax: S194.1

512 x 512
D

Mag: 1.0x
R

90.0 kV
88.0 mA
0.6 mm/-1.0:1
Tilt: 0.0
0.0 s
W:4000 L:400



MxView
Ex: 34553

Obr. 12

Se: 263281/191
Im: /1
:-1.0

512 x 512



FN U sv. Anny v Brne
ZKAMENELINA*XXYY
O 040218/001
Acc: XXYY
2004 Feb 18
Stdy Tm: 15:28:31

0.0 kV
0.0 mA
Tilt: 0.0
0.0 s
W:255 L:127

DFOV: 0.0 x 0.0cm

MxView
Ex: 34553

Obr. 14

Se: 263317/191
Im: /1
:-1.0

512 x 512

0.0 kV
0.0 mA
Tilt: 0.0
0.0 s
W:255 L:127

DFOV: 0.0 x 0.0cm

MxView
Ex: 34553

Obr. 16

Se: 263376/191
Im: /1
:-1.0

512 x 512



FN U sv. Anny v Brne
ZKAMENELINA*XXYY
O 040218/001
Acc: XXYY
2004 Feb 18
Stdy Tm: 15:28:31

0.0 kV
0.0 mA
Tilt: 0.0
0.0 s
W:255 L:127

DFOV: 0.0 x 0.0cm

MxView
Ex: 34553

Obr. 13

Se: 263273/191
Im: /1
:-1.0

764 x 764

0.0 kV
0.0 mA
Tilt: 0.0
0.0 s
W:255 L:127

DFOV: 0.0 x 0.0cm

MxView
Ex: 34553

Obr. 15

Se: 263333/191
Im: /1
:-1.0

512 x 512

0.0 kV
0.0 mA
Tilt: 0.0
0.0 s
W:255 L:127

DFOV: 0.0 x 0.0cm

Obr. 12 Tvar kanálku procházejícího hlavou plastiky jako vzduchový sloupec - modelováno v rámci 3D rekonstrukce. ■

Obr. 13 Endoskopický pohled do kanálku v rámci 3D rekonstrukce. ■

Obr. 14 Průnik bočního otvoru pro ruku do centrálního kanálku na řezu částí trupu sošky. ■

Obr. 15 Pootočením sošky v rámci 3D rekonstrukce a odfiltrováním části trupu se projevil menší otvor v dolní části těla. ■

Obr. 16 Rekonstrukce tvaru kanálku procházejícího trupem vymodelovaná jako vzduchový sloupec. ■

(CT) a v roce 1996 po příslušné moderní přestavbě valné části centrálního rentgenu angiografické a moderní skiaskopicko-skiografické pracoviště, což umožnilo posunout zobrazovací diagnostiku na vyšší úroveň. V roce 1998 bylo prosazeno vybudování pracoviště magnetické rezonance s jedním z nejmodernějších přístrojů v tomto oboru a klinika se tak postupně dostává vybavením mezi nejlepší pracoviště v Brně a okolním regionu. V závislosti na uvedených přístrojích se zvalitnila diagnostika a současně bylo umožněno provádění moderních intervenčních technik spjatých se zobrazovacími metodami. Kliniku vede od roku 1995 doc. MUDr. Petr Krupa, který se podílí na aplikaci zobrazovacích metod v rámci archeologie, antropologie a dějin umění.

V archeologii bylo CT využito k mnoha aplikacím. Nejčastěji byly pomocí CT zkoumány egyptské mumie. Výsledky jsou uvedeny v řadě prací a danou metodu mimo zdravotnické prostředí nejvíce zviditelnily. Díky aplikaci CT byly řešeny otázky nemocí a zranění egyptských panovníků a způsoby provedení mumifikace (Taylor 1994, 145-154). Výpočetní tomografie nejvíce napomohla pro stanovení příčiny úmrtí slavného muže z ledu Ötziho (Murphy – Nedden – Gostner – Knapp – Recheis – Seidler 2003, 614-629). Zajímavou se ukázala kombinace metod CT s dendrochronologií, zejména u předmětů a objektů, ze kterých nemůže být destruktivně odebrán vzorek. Významné uplatnění našlo CT v oblasti antropologie a paleoantropologie. Zde je nutné zdůraznit, že v počátcích využívání této metody v dané oblasti byl u nás pomocí CT zobrazen travertinový výlitek lebky z Gánovců (Vlček 1988, 353-362). Současné moderní metody v kombinaci s 3D rekonstrukce dospěly tak daleko, že jsme schopni rekonstruovat fyzický vzhled tváře vycházející z CT řezů zkoumaných lebek (Mafart – Delingette 2002). Podobných aplikací pro rekonstrukce podoby neznámých osob z kosterních pozůstatků využívá kriminalistika a forenzní antropologie.

4. Vlastní zobrazování artefaktů pomocí výpočetní tomografie (CT)

Před zahájením vlastních aplikovaných výzkumů pomocí CT jsme si vytvořili objekt pro testování přístroje, který nás měl informovat o možnostech rozlišení předmětů a jejich denzitě, která může napomoci při identifikaci materiálů v archeologických situacích. Použili jsme keramickou nádobu, do ní jsme vložili kamenný sekeromlat, sílexovou čepel, kost, kovový předmět a jako zásyyp jsme použili běžnou písčitou půdu (**obr. 1**). Získané kontrasty a denzity sledovaných artefaktů nám umožnily lepší orientaci při zkoumání neznámých objektů.

V Těšeticích „Sutnách“ byly z objektu horákovské kultury (č. obj. 1653) vyzvednuty dvě grafitové koule (5,5 a 2,7 kg). Původně byly v těchto předmětech hledány náhodně vypálené hmoty pro hrnčířskou výrobu, protože jejich povrch se jevil poměrně homogenní a nápadně se podobal střepům grafitové keramiky ze stejného objektu. Při zobrazování řezů koule menší hmotnosti (**obr. 2**) se ukázalo, že se jedná velmi heterogenní materiál. Obdobnou strukturu vykazovala i větší grafitová

koule. Z řezů lze konstatovat, že koule neobsahují samotnou grafitovou hmotu, ale grafitové horniny s „hlušinou“, se kterou se grafit na výchozech nachází.

Díky aplikaci CT se celkově změnila interpretace sledovaného objektu. Jde o unikátní doklad transportované grafitové suroviny z míst těžby na místo jejího upotřebení pro zhotovování keramiky. Mikropetrografickými rozbory bylo prokázáno, že grafit s největší pravděpodobností pochází z oblasti v okolí Českého Krumlova (Hložek – Gregerová – Ramsl – Golec 2003, 126). Transportní podoba suroviny v podobě koulí byla asi vhodná pro individuální odnos ve vácích, nůších nebo zavěšení na transportní zvířata, neboť neprostupný terén v odlehlých neosídlených zalesněných oblastech s ložisky grafitu nebyl vhodný pro transport na povozech. Grafitová koule nasvědčuje tomu, že grafit nebyl v místech těžby upravován a distribuoval se spolu s doprovodnými minerály a horninami. Grafitová koule obsahovala železité minerály, sillimanit, mramory, kvarcity a právě tyto horniny vytváří na řezech kontrasty, protože mají různou densitu.

Na záchranném archeologickém výzkumu v Modřicích (Sádka, provozovna firmy MAN) bylo zdokumentováno 111 žárových hrobů z doby římské. In situ jsme vyzvedli jeden ze žárových hrobů, který obsahoval keramickou nádobu s popelem a několik kovových artefaktů. Vyzvednutý hrob byl dopraven na oddělení výpočetní tomografie a s obalem byl umístěn na vyšetřující část přístroje (obr. 3).⁹

Na tomto místě je nutné zdůraznit, že případné obaly nutné k přepravě a manipulaci s vyzvednutými objekty je CT schopen odfiltrovat, nesmí ovšem obsahovat větší kovové části. Řezy žárovým pohřbem dokumentují stěny keramické nádoby, ve které lze pozorovat průřezy spálených kostí (obr. 6). Při vyzvednutí hrobu bylo zřejmé, že většina milodarů se nachází mimo keramickou nádobu a jsou rozptýleny v hlíně při okraji nádoby. Při prvotním kolmém RTG náhledu (obr. 4) bylo možné identifikovat kopí, nůž, přezku a části plechů bronzových nádob. Pomocí 3D rekonstrukce byly vysegmentovány z hlíny nůž a přezka (obr. 7, 8), které je pomocí příslušného softwaru možné sledovat v různých pohledech. Obdobně lze vysegmentovat jednotlivé kosti z obsahu nádoby a předběžně je antropologicky posoudit. Limitující jsou kovové předměty a materiály s vyšším atomovým číslem, které pohlcují veškeré RTG záření a v důsledku toho vznikají za předmětem paprskité artefakty (obr. 5). Takto rušený obraz může ztížit identifikaci okolních předmětů. V rámci průzkumů žárových hrobů je největším přínosem této metody trvalá dokumentace nálezové situace uvnitř, případně vně uložených artefaktů a lidských ostatků v keramických nádobách.

V rámci řešení otázek technik mladopaleolitického umění bylo zkoumáno torzo sošky muže z Francouzské ulice (Brno II), která pochází z období pavlovienu a je považována za první skládanou plastiku - loutku. Předběžný RTG náhled na hlavu a trup sošky vyřezané z mamutoviny prokázal předpokládaný průběh otvorů hlavou a trupem (obr. 9). Otázkou bylo, zda otvor probíhající hlavou a trupem plastik je

⁹ Na tomto místě by autoři rádi poděkovali Mgr. Petru Kosovi a Mgr. Davidu Parmovi (ÚAPP Brno) za poskytnutí nálezu a pomoc při jeho přepravě na Kliniku zobrazovacích metod Fakultní nemocnice u svaté Anny v Brně.

přirozený kanálek klu nebo jsou zde dokumentovatelné mechanické zásahy. Řezy hlavou plastiky prokázaly, že tento nález se po vyzvednutí rozpadal a při následném laboratorním zpracování nebyly vlepeny do původní polohy některé lamely mamutoviny (**obr. 10**). Řez střední částí hlavy plastiky dokumentuje nepravidelný průřez kanálku a cizorodý útvar, který prozatím nejsme schopni blíže specifikovat (**obr. 11**). Přístroj je schopen v rámci 3D rekonstrukce vymodelovat tvar kanálku procházejícího hlavou jako vzduchový sloupec (**obr. 12**). Dále je možný endoskopický pohled do kanálku v rámci 3D rekonstrukce (**obr. 13**). Při řezech částí trupu sošky byl zdokumentován průnik bočního otvoru pro ruku do centrálního kanálku (**obr. 14**). Pootočením sošky v rámci 3D rekonstrukce a odfiltrováním části trupu se projevil menší otvor v dolní části těla (**obr. 15**) rekonstrukce tvaru kanálku procházejícího trupem vymodelovaná jako vzduchový sloupec (**obr. 16**), kde opět ve středu kanálku zachycujeme neznámý útvar, který byl zachycen i v kanálku hlavy. Velmi nepravidelný tvar kanálku probíhajícího hlavou a trupem by mohl potvrzovat předpokládané patologické změny v použitém klu (Valoch 1993, 56).

V rámci tohoto článku byly uvedeny prozatím nejdůležitější výstupy aplikací výpočetního tomografu na archeologických objektech. Během společné spolupráce jsme pomocí CT zobrazili řadu dalších předmětů. Méně úspěšné bylo zobrazování objektů obsahující materiály s podobnou denzitou, kdy zanikaly kontrasty, které by napomohly oddělit jednotlivé materiály. Výzkum se i nadále bude především orientovat na výzkum paleolitického umění a průzkumy žárových hrobů.

5. Závěr

CT je bezesporu diagnosticky velmi přínosným přístrojem, který se stále zlepšujícími technologiemi může kromě oboru lékařské činnosti nabídnout své služby řadě jiných oborů. Je nepochybné, že s dalším zrychlováním a zkvalitňováním CT přístrojů spolu s se zdokonalováním rekonstrukčního a zpracovávacího softwaru se dále bude rozšiřovat indikační šíře a možnosti využití těchto přístrojů v archeologii, antropologii, muzeologii a dějinách umění.

Literatura

- Bruna, J. 1988: Celotělová výpočetní tomografie. Praha.
- Ferda, J. - Novák, M. - Kreuzberg, B. 2002: Výpočetní tomografie. Praha.
- Hložek, M. - Gregerová, M. - Rams, P. - Golec, M. 2003: Mikropetrografické rozborby halštatské grafitové keramiky z Těšetic „Suten“ a Traisentalu. In: Golec, M.: Těšetice - Kyjovice VI. Horákovská kultura v těšetickém mikroregionu, 122-129. Brno.
- Mafart, B. - Delingette, H. (ed.) 2002: Three-Dimensional Imaging in Paleoanthropology and Prehistoric Archaeology. Acts of the XIVth UISPP Congress, University of Liège, 2-8 September 2001. Belgium.
- Murphy, W. - Nedden, D. - Gostner, P. - Knapp, R. - Recheis, W. - Seidler, H. 2003: The Iceman: Discovery and Imaging, Radiology 226, 614-629.
- Taylor J. 1994: CT Scanning of a Mummy, Egyptian Archaeology 4, 145-154.
- Vlček, E. 1988: Gánovecký nález v CT - počítačové tomografii, SIA XXXVI-2, 353-362.
- Valoch, K. 1993: V září ohňů nejstarších lovců. In: Podborský (ed.): Pravěké dějiny Moravy. Brno.