

Stanovení rtuti v segmentovaných vzorcích vlasů Tychona Brahe metodou RNAA a metodou μ -PIXE a rozbor nosních kůstek vchodu do nosní dutiny metodou INAA

Jan Kučera, Jan Kameník, Vladimír Havránek

Ústav jaderné fyziky AV ČR, v.v.i., Řež

Tycho Brahe, původním jménem Tyge Ottesen Brahe, věhlasný dánský astronom, jenž od roku 1599 působil jako dvorní astronom na dvoře Rudolfa II., zemřel po krátké jedenáctidenní nemoci 24. října 1601 ve věku 54 let a byl pohřben v kostele Matky Boží před Týnem (Týnský chrám) v Praze. Dne 13. října 1601 se Brahe zúčastnil hostiny u Petra Voka z Rožmberka. Podle historických záznamů mnohou číši vína vypil a z důvodu dvorní etikety nebyl močit; později již močit nemohl. O průběhu nemoci a okolnostech jeho smrti existují tři zápisy^{1,2}. Jeden od jeho asistenta Johanna Keplera, další od Brahova přítele a osobního lékaře Johanna Jessenia a třetí od mladého německého lékaře Johanna Witticha. První dva popisují příznaky urémie – zástavu močení, silné bolesti, nespavost, horečku, agónii a zvolna nastupující delirium. J. Wittich, jenž byl v Praze v době úmrtí Tychona Brahe, ale neléčil jej, mínil, že zástavu močení způsobil kámen a že mu praskl močový měchýř. Ačkoli je prasknutí měchýře z medicínského hlediska velmi nepravděpodobné, Wittichova „diagnóza“ se značně rozšířila a dala rovněž vzniknout prvním spekulacím, že byl Tycho Brahe otráven.

Hrobku Tychona Brahe otevřeli při příležitosti třístého výročí jeho smrti v roce 1901 antropolog doc. Jindřich Matiegka a konzervátor Jan Herain s cílem ověřit, zda i v pobělohorské době byly ostatky Tychona Brahe v Týnském chrámu zachovány (Brahe byl luterán pohřbený v původně utrakvistickém kostele, který přešel v roce 1621 do správy katolické církve), a také kvůli rekonstrukci jeho hrobky. Po úspěšné identifikaci byly Brahovy ostatky uloženy do nově vyrobené cínové rakve a umístěny zpět do hrobky. Část pohřebních textilií, vlasů a vousů byla deponována v Muzeu hl. města Prahy. V roce 1991 získalo darem některé textilie a vzorek vousů velvyslanectví Dánského království v Praze. Tyto vzorky byly převezeny do Dánska. O dva roky později provedl jejich analýzu spolu s dalšími zapůjčenými vzorky vlasů a vousů Bent Kæmpe z Ústavu soudního lékařství Univerzity v Kodani metodou AAS³ a v roce 1996 Jan Pallon z Univerzity v Lundu ve Švédsku metodou μ -PIXE (μ -Particle Induced X-Ray Emission). B. Kæmpe zjistil obsah rtuti $6,20 \mu\text{g g}^{-1}$, což – jak uvedeme dále – není nikterak vysoká hodnota. J. Pallon výsledky měření nekvantifikoval ani časopisecky nepublikoval; jeho výsledky umístěné na internetu ukazovaly zdánlivě „vysoké“ koncentrace rtuti v oblasti kořínku vlasu. Tato informace však stačila americkým žurnalistům Joshuovi a Anne-Lee Gilderovým k vytvoření mnoha spekulací o otravě Tychona Brahe^{4,5}. Podle autorů měla být smrtelná dávka rtuti podána Brahemu dvakrát – v den hostiny u Petra Voka z Rožmberka a 13 hodin před smrtí. Hlavním podezřelým z otravy měl být J. Kepler – Brahův asistent. Dánský historik Peter Hvilshøj Andersen Vinilandicus označil za jiného podezřelého Erika Brahe, vzdáleného švédského Tychonova příbuzného; jednat prý měl na příkaz dánského krále Kristiána IV. Tato obvinění, jež se zakládají převážně na domněnkách či spekulacích, vedla dánského antropologa Jense Velleva k úsilí o znovuootevření Brahovy hrobky a prozkoumání jeho ostatků s cílem objasnit, byl-li skutečně otráven. J. Vellev povolení po několika letech získal a hrobka byla otevřena ve dnech 15. až 19. listopadu 2010. Ke zkoumání ostatků byl vytvořen dánsko-český tým zahrnující archeology, antropology, lékaře, fyziky a chemiky. Po prozkoumání hrobky a odběru vzorků byly ostatky znovu umístěny do cínové rakve a pietně uloženy zpět do hrobky.

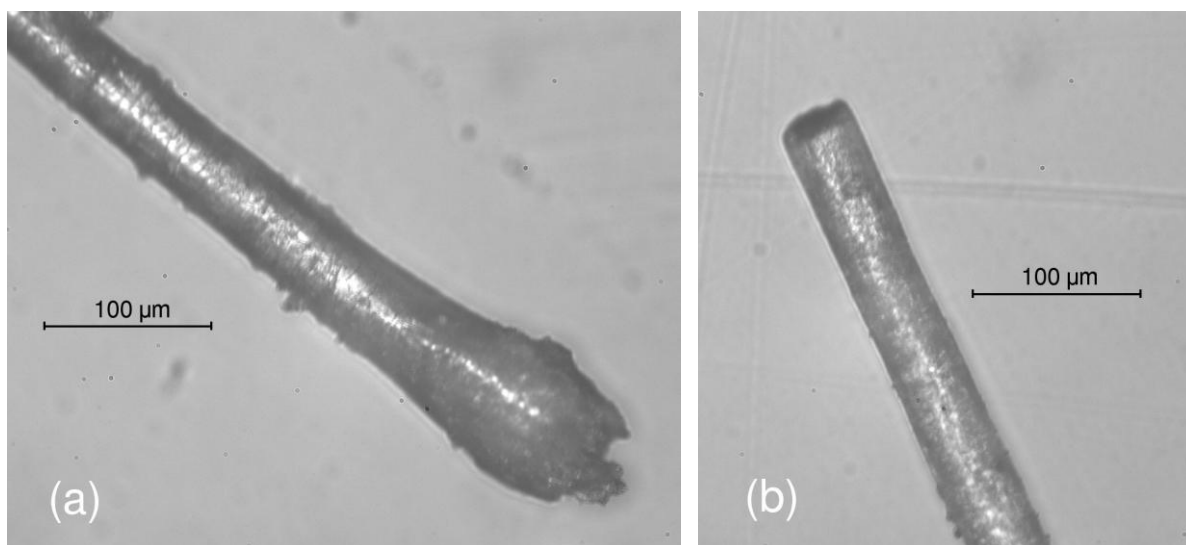
Pro vyloučení nebo potvrzení úmrtí Tychona Brahe v důsledku otravy rtutí bylo nejdůležitější zjistit časový průběh obsahu prvku ve vlasech a vousích. Vlasy i vousy uchovávají záznam o

expozici organismu prvkům i jiným látkám. Při známé rychlosti růstu vlasů (nejčastěji se udává 10 mm za měsíc^{6,7}) lze stanovením prvků po délce vlasu určit časový průběh expozice. Např. první úsek od kořínku o délce 5 mm podává informaci o příjmu prvků organismem v posledních 14 dnech života, druhý stejně dlouhý úsek ukazuje na expozici v období života mezi 15–30 dny před smrtí, atd. Této vlastnosti vlasů se využívá i v kriminalistice, např. pro rozlišení akutní a chronické otravy organismu toxickými prvky. Nález vysoké koncentrace toxického prvku u kořínku vlasu značí nedávnou akutní otravu, nález zvýšené koncentrace podél celého vlasu znamená dlouhodobou chronickou otravu, která trvala několik měsíců. Kromě vlasů byly zkoumány i drobné kůstky ze vchodu do nosní dutiny (*Apertura piriformis*) z jen částečně zachovalé obličejové části Tychona Brahe metodou instrumentální neutronové aktivační analýzy (INAA). Cílem bylo pokusit se zjistit z jakého materiálu byla nosní protéza, kterou Tycho Brahe nosil po ztrátě části nosu v souboji v r. 1566.

Experimentální část

Příprava vzorků

Byly analyzovány vlasy a vousy získané jak při otevření hrobky v r. 1901 (vlas TB77), tak při otevření v r. 2010 (vlas TB38, krátká bradka TB39, dlouhý knír TB41). Vlasy jsme mechanicky zbavili zbytků tkáně a prozkoumali pod mikroskopem. Vlasy či vousy s jasně identifikovanými kořínky (viz. Obr. 1) jsme rozřezali na úseky dlouhé 5 mm a omyli jsme je postupem doporučeným Mezinárodní agenturou pro atomovou energii (MAAE) v acetonu čistoty p.a., třemi podíly deionizované vody a nakonec opět v acetonu p.a., vždy po dobu 10 min.^{6,8}.



Obr. 1 Mikrofotografie dobře identifikovaného kořínku (a) a konce vlasu (b). Délka vložené úsečky je 0,1 mm. Foto: J. Kameník.

Segmentované vzorky získané z 20–25 jednotlivých vlasů, 10 krátkých vousů a 3 dlouhých vousů, jejichž hmotnost činila 111–629 μg byly zataveny do ampulí z křemenného skla (Suprasil[®] AN, Heraeus, Německo). Ampule byly před použitím vyčištěny loužením v podvarové HNO₃ zředěné 1+5 a vymytím deionizovanou vodou. Vlasy a vousy, u nichž nebyly identifikovány kořínky (zlomené vlasy či vousy, atd.) byly podrobeny stejné čisticí proceduře a zataveny do diskových polyethylenových (PE) pouzder o průměru 25 mm. Hmotnosti těchto celkových vzorků byly v rozmezí 0,825–4,291 mg. PE pouzdra byla rovněž před použitím vyčištěna loužením v podvarové HNO₃ zředěné 1+5 a vymytím deionizovanou

vodou. Pro kontrolu správnosti výsledků analýz byly použity vzorky standardního referenčního materiálu (SRM) amerického National Institute of Standards and Technology (NIST) NIST SRM 1515 Apple Leaves o hmotnosti 120–130 mg, které byly naváženy jak do ampulí z křemenného skla, tak do PE pouzder. Kromě vousů a vlasů byly analyzovány i kůstky z nosního otvoru z ostatků obličejové části (*Apertura piriformis*). Dva malé úlomky *A. piriformis* byly bez čištění zataveny do PE pouzder. Přehled hmotností analyzovaných vzorků je uveden v Tab. 1.

Tab. 1 Hmotnosti analyzovaných vzorků

Vzorek	Segment	Hmotnost, μg
TB38-1	0–5 mm	280
TB38-2	5–10 mm	227
TB38-3	10–15 mm	244
TB38-4	15–20 mm	225
TB38 celkový	-	4 291
TB39-1	0–5 mm	629
TB39-2	5–10 mm	584
TB39-3	10–15 mm	478
TB39 celkový	-	2 695
TB77-1	0–5 mm	295
TB77-2	5–10 mm	306
TB77-3	10–15 mm	285
TB77-4	15–20 mm	253
TB77 celkový	-	825

Vzorek	Segment	Hmotnost, μg
TB41-1	0–5 mm	158
TB41-2	5–10 mm	184
TB41-3	10–15 mm	207
TB41-4	15–20 mm	207
TB41-5	20–25 mm	216
TB41-6	25–30 mm	198
TB41-7	30–35 mm	187
TB41-8	35–40 mm	171
TB41-9 ^a	40–50 mm	111
TB41-10 ^b	50–75 mm	296
<i>A. piriformis</i>	-	6 136

^a vzorek ze dvou nejdelších vousů

^b vzorek z nejdelšího vousu

Radiochemická neutronová aktivační analýza (RNAA)

Vzorky segmentovaných vlasů v zatavených ampulích z křemenného skla byly ozářeny v jaderném reaktoru LVR-15 Centra výzkumu Řež, s.r.o. hustotou toku tepelných neutronů $3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ po dobu 20 hod v rámci infrastruktury CANAM (projekt MŠMT LM2011019). Jedno ozařovací pouzdro obsahovalo 4–10 vzorků segmentovaných vlasů či vousů, prázdnou ampuli (blank), standard rtuti pro relativní standardizaci a jeden vzorek NIST SRM 1515 Apple Leaves. Po vymírací době 10–14 dnů byl použit dříve publikovaný postup RNAA⁹ s následujícími úpravami. Ampule se vzorky byly zbaveny povrchové kontaminace krátkým varem v lučavce královské a omytím vodou. Pak byly zabaleny do tenké vrstvy buničitého papíru, ochlazeny v kapalném dusíku a rozdrceny. Po přidání 100 μg neaktivního nosiče rtuti byly vzorky i se střepey ampulí mineralizovány v 4 ml zředěné HNO_3 (1+1) v tlakové teflonové nádobce účinkem mikrovlnného ohřevu v zařízení ERTEC Magnum II (Polsko). Střepey ampulí byly odfiltrovány a roztok vzniklý mineralizací byl zředěn do 10 ml vodou. Radiochemická separace vzniklého radionuklidu ^{203}Hg byla provedena extrakcí dvěma 3 ml podíly roztoku 0,01 mol l^{-1} diethyldithiokarbamidanu nikelnatého ($\text{Ni}(\text{DDC})_2$) v chloroformu z prostředí $\sim 1 \text{ mol l}^{-1}$ HNO_3 . Spojené frakce organické fáze byly měřeny 8 hod ve studnovém HPGe detektoru (účinný objem 150 cm^3 , rozlišení FWHM 2,1 keV pro gama-linku 1332,5 keV radionuklidu ^{60}Co), který byl spojen řetězcem lineární elektroniky s gamaspektrometrem Canberra Genie 2000. Ke kvantifikaci byla použita gama-linka 279,2 keV radionuklidu ^{203}Hg porovnáním s ozářeným standardem rtuti. Standard byl připraven rozpuštěním kovové rtuti v koncentrované HNO_3 pod zpětným chladičem, po ozáření byl kvantitativně vymyt z ampule z křemenného skla, gravimetricky zředěn podle potřeby a měřen jako vzorky. Pro rozklad vzorků NIST SRM 1515 byla při rozkladu v mikrovlnném zařízení použita koncentrovaná HNO_3 a vzniklý roztok byl naředěn tak, aby koncentrace HNO_3 při extrakci $\text{Ni}(\text{DDC})_2$ byla v rozmezí 1–2 mol l^{-1} .

Metoda μ -PIXE

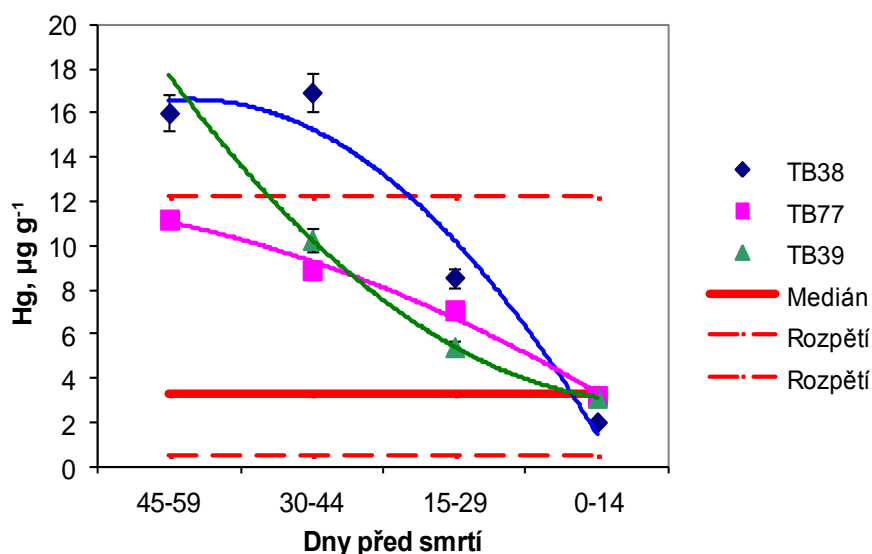
Vzorky vlasů TB38 a TB77 byly ozařovány po mechanickém odstranění přilehlé tkáně fokusovaným svazkem protonů (průměr svazku 1,5 μm) o energii 2,6 MeV v urychlovači TANDETRON 4130 MC. Bylo provedeno mnohonásobné skenování 500 μm segmentů vzorků vlasů při proudu svazku 0,1 nA po dobu 1–3 hod. Vzbuzené záření X bylo měřeno polovodičovým planárním Si(Li) detektorem o ploše 80 mm^2 s rozlišením 150 eV pro záření $K_{\alpha 1}$ linky Mn o energii 5,9 keV. Odstranění povrchové kontaminace vlasů loužicím postupem MAAE nebylo v tomto případě nutné, protože prostorové rozlišení svazku umožňuje rozpoznat obsah prvku na povrchu a uvnitř vlasu.

Instrumentální neutronová aktivační analýza (INAA)

Celkové vzorky vlasů a vzorek *A. piriformis* byly podrobeny INAA s krátkodobým i dlouhodobým ozářením. Podmínky ozařování a měření vzorků a multielementních standardů pro relativní standardizaci byly popsány v našich dřívějších pracích^{10,11}, proto zde budou uvedeny jen stručně. Po krátkodobém ozařování pneumatickou potrubní poštou hustotou toku tepelných neutronů $3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ po dobu 1 min. byly vzorky a standardy měřeny po dobu $t_c=10$ min. po vymírací době $t_d=10$ min. koaxiálním polovodičovým koaxiálním HPGe detektorem s relativní účinností 23%, rozlišení FWHM 1,80 keV pro gama linku ^{60}Co o energii 1332,5 keV ve vzdálenosti od detektoru (Geo) 1 cm. Po dlouhodobém ozařování (2 h) hustotou toku $4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ byly vzorky a standardy měřeny ve dvou režimech: 1) $t_d=2$ dny, $t_c=30$ min., Geo=3 cm, a 2) $t_d=21$ dnů, $t_c=3$ h, Geo=1 cm. V obou případech byl použit koaxiální HPGe s relativní účinností 78 %, rozlišení FWHM 1,85 keV pro gama linku ^{60}Co o energii 1332,5 keV spojený řetězcem lineární elektroniky, který obsahoval Loss Free Counting modul Canberra 599 pro korekci proměnné mrtvé doby měření a efektu nakupení impulzů, s gama-spektrometrem Canberra Genie 2000.

Výsledky a diskuse

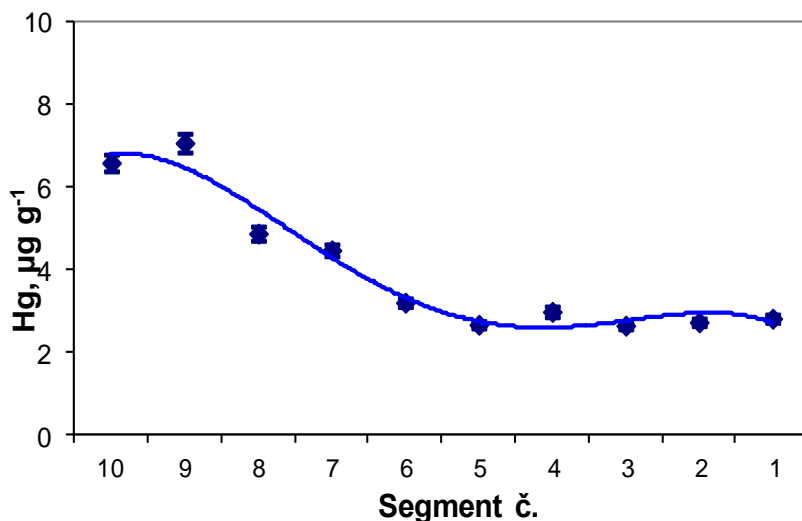
Časový průběh koncentrace rtuti v segmentech vlasů TB38, které byly odebrány v roce 2010, vlasů TB77 odebraných v roce 1901 a později uložených v Muzeu hl. m. Prahy a vousů TB39 z odběru v r. 2010 jsou uvedeny na Obr. 2. Nalezené obsahy rtuti jsou v grafu porovnány s mediánem a rozpětím koncentrace rtuti ve vlasech současné, profesionálně neexponované populace¹².



Obr. 2 Časový průběh koncentrace Hg ve vlasech a krátkých vousích Tychona Brahe.

Výsledky RNAA jsme potvrdili lokální analýzou metodou μ -PIXE v jednom vlasu TB77, v němž jsme našli obsahy rtuti ve vzdálenosti 0–2,5 mm od kořínku vlasu v rozmezí 3,1–7,6 $\mu\text{g g}^{-1}$; ve vzdálenosti 10–15 mm od kořínku pak činily obsahy rtuti 6,1–11,9 $\mu\text{g g}^{-1}$. Další, rozhodné potvrzení správnosti výsledků poskytla analýza NIST SRM 1515 Apple Leaves. Nalezené obsahy rtuti $0,042 \pm 0,004 \mu\text{g g}^{-1}$ (aritmetický průměr \pm směrodatná odchylka, N=7) byly ve vynikající shodě s certifikovanou hodnotou NIST¹³ $0,044 \pm 0,004 \mu\text{g g}^{-1}$. Také obsahy rtuti stanovené metodou INAA v celkových vzorcích vlasů TB38, TB39 a TB77 postupně $10,7 \pm 0,5 \mu\text{g g}^{-1}$, $11,7 \pm 0,3 \mu\text{g g}^{-1}$, a $10,6 \pm 0,8 \mu\text{g g}^{-1}$ spadají do intervalu hodnot pro segmentované vzorky vlasů a reprezentují „průměrné“ obsahy rtuti ve vlasech za období posledních dvou měsíců života Tychona Brahe. Hodnoty zjištěné všemi použitými metodami nejsou v rozporu s výsledkem, který v roce 1993 naměřil B. Kæmpe metodou atomové absorpční spektrometrie v celkovém vzorku vlasů ($6,20 \mu\text{g g}^{-1}$)³. Z Obr. 2 je zřejmé, že obsahy rtuti ve vlasech i vousech Tychona Brahe klesají v posledních fázích jeho života na úroveň mediánu u současné populace. Nejvyšší nalezené obsahy (asi dva měsíce před smrtí) mírně překračují horní hranici rozpětí u současné populace. Takové hodnoty se vyskytují převážně u osob konzumujících hodně ryb a plodů moře kontaminovaných methylrtutí. I nejvyšší nalezené hodnoty přes $12 \mu\text{g g}^{-1}$ však nejsou toxikologicky významné, protože jsou podstatně nižší než rozpětí 200–800 $\mu\text{g g}^{-1}$, jež se nachází u osob s mírnou otravou rtutí¹⁴. Pro srovnání, obsah rtuti v domnělých vlasech Sira Isaaca Newtona¹⁵, který dle zaznamenaných symptomů trpěl chronickou otravou rtutí, byl až $197 \mu\text{g g}^{-1}$. Analýzou vlasů jsme tedy zjistili, že příčinou smrti Tycha Brahe nebyla akutní otrava rtutí, o níž spekovali manželé Joshua a Anne-Lee Gilderovi ve své knize^{4,5}.

Analýza segmentů z 3 dlouhých vousů kníru o délce 4–7,5 cm měla poodhalit expozici rtuti Tychona Brahe v delším období před smrtí. Analýza byla komplikovaná skutečností, že u všech tří kusů byl kořínek identifikován s menší jistotou, než tomu bylo u vlasů. Výsledky obsahu rtuti v segmentovaných vousech kníru Tychona Brahe jsou uvedeny na Obr. 3.



Obr. 3 Koncentrace Hg v segmentech z dlouhého kníru Tychona Brahe (vzorek TB41). Segment č. 1 nejbliže kořínku, délka segmentů 5 mm (č. 1–8), 10 mm (č. 9) a 25 mm (č. 10).

Obsahy rtuti v jednotlivých úsecích byly v rozmezí 3–7 $\mu\text{g g}^{-1}$ a odpovídaly obsahům stanoveným ve vzorcích vlasů. V tomto případě nebyl pozorován tak výrazný pokles obsahu rtuti ve dvou segmentech nejbliže domnělému kořínku, tak jako u vzorků vlasů a krátkých

vousů na Obr. 2. Důvodem by mohlo být to, že všechny tři analyzované vzorky kníru byly těsně před smrtí Tychona Brahe v telogenní fázi vlasového váčku, v níž váček není metabolicky aktivní, vous neroste a nezaznamenává tedy informaci o obsahu rtuti v krvi. Proto vzorky dlouhého vousu nemusely ukázat mírný pokles v přibližně posledním měsíci života Tychona Brahe, tak jak to bylo pozorováno u vzorků vlasů. I ve vzorcích vlasů mohly být některé vlasové váčky v telogenní fázi, jejich vliv na celkový výsledek byl však menší, protože k analýze byl použit větší počet vlasů (20–25) a také proto, že u vlasů je zastoupení vlasových váček v telogenní fázi nižší než u vousů¹⁶. I přes větší nejistotu v určení období, které analyzované vousy kníru Tychona Brahe reprezentují, výsledky indikují, že ani v období přibližně 6–9 měsíců před smrtí nedocházelo k významnější expozici rtuti. Časový údaj byl odhadnut z uváděné rychlosti růstu vousů 0,27 mm za den¹⁷ a délky analyzovaných segmentů. Údaje o expozici Tychona Brahe rtuti v mnohem delším období, než je možné zjistit z analýzy vlasů či vousů, i když s méně přesným časovým rozlišením, jsme získali z analýzy kostí. Většina výsledků byla získána v Dánsku metodou CV-AAS¹⁸. Na rozdíl od vlasů, v nichž zůstávají z organismu vyloučené prvky a další látky pevně deponovány, složení kostí se v průběhu života poněkud obměňuje. Obsah rtuti v kostech ukazuje na příjem rtuti v období před několika lety, u kompaktního typu kostí asi před 10 lety, u trabekulárního typu kostí v období o několik let kratším¹⁹. V kompaktní části stehenní kosti byl zjištěn¹⁸ obsah rtuti $0,054\text{--}0,074 \pm 0,001 \mu\text{g g}^{-1}$, v trabekulární části kosti pánevní činil obsah rtuti $0,092 \pm 0,001 \mu\text{g g}^{-1}$. Porovnání s literárními hodnotami²⁰ pro zdravou současnou populaci v rozmezí $0,018\text{--}0,62 \mu\text{g g}^{-1}$ ukazuje, že Brahe nebyl významně exponován rtuti ani v období několika let před smrtí. Příčinou jeho úmrtí tak nemohla být ani chronická otrava rtutí.

Mírně zvýšené obsahy rtuti ve vlasech a vousech Tychona Brahe nejsou překvapivé. Po mnoho let se rtutí pracoval – při pozlácování svých pozorovacích přístrojů amalgamací či při alchymistických experimentech. Brahe byl nejen vynikajícím astronomem, ale zabýval se také alchymii jako mnoho jiných renesančních velikánů. Coby stoupenec Paracelsa se proto zajímal nikoli o transmutaci kovů, nýbrž o přípravu léčivých přípravků – elixírů či arkán. Je známo, že tzv. Tychonův elixír *Medicamenta tria* se skládal, jak název napovídá, ze tří složek, z nichž jedna obsahovala rtuť. Je pravděpodobné, že účinky elixíru mohl zkoumat na sobě, než jej darem předal přátelům a známým nebo věřil jeho účinkům natolik, že ho sám užíval jako lék.

Analýza úlomků kůstek *A. piriformis* měla jiný cíl než zkoumat expozici rtuti. Pokusili jsme se zjistit z jakého materiálu byla vyrobena kovová nosní protéza, kterou Tycho Brahe nosil po značnou část svého života. Protéza se nenašla ani při otevření hrobky v r. 1901 ani při opětovném otevření v r. 2010. Spekulovalo se, že byla vyrobena ze slitiny zlata a stříbra. Metodou INAA jsme v úlomech uvedených kůstek stanovili vysoké obsahy mědi ($7780 \pm 307 \mu\text{g g}^{-1}$) a zinku ($8070 \pm 309 \mu\text{g g}^{-1}$) – zřejmě v důsledku kontaminace otěrem nebo korozními produkty materiálu protézy. Z poměru obsahů obou prvků se jeví nejpravděpodobnější, že protéza byla vyrobena z mosazi.

Závěr

Stanovení rtuti v segmentovaných vlasech a vousech a kostech Tycha Brahe bylo provedeno ve vzorcích s nezpochybnitelnou autenticitou. Správnost výsledků stanovení Hg metodou RNAA byla prokázána analýzou standardního referenčního materiálu NIST SRM 1515 Apple Leaves, rámcovou shodou s výsledky $\mu\text{-PIXE}$ a také shodou s výsledky INAA pro nesegmentované, celkové vzorky vlasů. Z porovnání hladin rtuti ve vlasech a vousech s normálními hodnotami pro současnou populaci vyplývá, že příčinou smrti Tychona Brahe nebyla akutní otrava rtutí, o níž se spekulovalo. Z výsledků analýzy kostí vyplývá, že Tycho

Brahe nebyl významně exponován rtuťí ani dlouhodobě, tedy že netrpěl chronickou otravou rtuťí. Stanovení vysokých obsahů mědi a zinku a jejich poměru přibližně 1:1 v kůstkách *A. piriformis* naznačuje, že nosní protéza Tychona Brahe byla nejspíše vyrobena z mosazi.

Tato studie byla podpořena Grantovou agenturou ČR (grant P108/12/G108).

1. Vellev J., Tycho Brahes begravelse i Prag, in *Tycho Brahes Verden. Danmarki Europa 1550–1600. The World of Tycho Brahe* (ed. P Grinder-Hansen), pp. 229–43, The National Museum, Copenhagen (2006). English summary, p. 277: Tycho Brahe's burial in Prague.
2. Janovský, I., Tycho Brahe's death: facts and speculations, In *Kepler's heritage in the space age (400th anniversary of Astronomia nova)* (eds. A. Hadravová, T. J. Mahoney and P. Hadrava), National Technical Museum, Prague (2010), pp. 126–35.
3. Kæmpe B., Thykier C., *Naturens Verden* 1993, 425–34.
4. Gilder J., Gilder A.-L., *Heavenly intrigue: Johannes Kepler, Tycho Brahe, and the murder behind one of history's greatest scientific discoveries*, Doubleday, New York, 2004.
5. Gilder J., Gilder A.-L., *Nebeská intrika. Johannes Kepler, Tycho Brahe a tragický příběh v pozadí jednoho z nejvýznamnějších vědeckých objevů*, Praha, Leda, 2008.
6. Chatt A., Katz S. A., *Hair analysis: applications in the biomedical and environmental sciences*, VCH Publishers, New York, 1988, pp. 77–81.
7. Benner B. A. Jr., Levin B. C., *Hair and human identification*, in *Hair in toxicology: an important bio-monitor* (ed. D. J. Tobin), Ch. 5, pp. 104–124, The Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK, 2005.
8. Ryabukhin Y. S., *Activation analysis of hair as an indicator of contamination of man by environmental pollutants*, IAEA Report IAEA/RL/50, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1978.
9. Kučera J., Soukal L., *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 168 (1993) 185–199.
10. Kučera J., Soukal L., *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 121 (1988) 245–259.
11. Kameník J., Kučera J., Havránek V., Kubešová M., *Přednášky semináře Radioanalytické metody IAA-11*, Praha, 29. - 30. června 2011 (ed. J. Mizera), Spektroskopická společnost Jana Marka Marci, 2012, ISBN 978-80-904539-4-4, s. 46–52.
12. Iyengar V., Woittiez J., *Clin. Chem.* 34 (1988) 474–481.
13. U.S. National Institute of Standards and Technology, Certificate of Analysis, Standard Reference Material 1515 Apple Leaves, Gaithersburg MD, 20899, January 22, 1993.
14. Gerstner H. B., Huff J. E., *J. Toxicol. Environ. Health* 2 (1977) 491–526.
15. Spargo P. E., Pounds C. A., *Notes Rec. R. Soc. London* 34 (1979) 11–32.
16. <http://www.laser-centrum-brno.cz/clanky/strucne-o-biologii-vlasu-ochlupeni/>
17. Harkey M. R., *Forensic Sci Int* 63 (1993) 9–18.
18. Rasmussen K. L., Kučera J., Skytte L., Kameník J., Havránek V., Smolík J., Velemínský P., Lynnerup N., Brůžek J., Vellev J., *Archaeometry* 55 (2013) 1187–1195.
19. International Commission on Radiological Protection, *Reference man: anatomical, physiological and metabolic characteristics*, ICRP Publication 23, Elsevier, Amsterdam 1975.
20. Iyengar G.V., Tandon L. *Minor and Trace Elements in Human Bones and Teeth. NAHRES-39*, International Atomic Energy Agency, Vienna, (1999).

Determination of mercury in sectioned hair samples of Tycho Brahe by RNAA and μ -PIXE, and assay of bones *Apertura piriformis* by INAA

Jan Kučera, Jan Kameník, Vladimír Havránek

Nuclear Physics Institute, Academy of Sciences of the Czech Republic, Řež

World-renowned Renaissance astronomer Tycho Brahe died on 24 October 1601, after 11 days of illness. Several conspiracy theories regarding his death have been aired, the first shortly after his death. A key factor in the still lively debate is whether he was administered mercury—as medicine by his own hand, or as poison by an unfriendly hand. In 2010, Brahe's grave was reopened and new samples of his hair, beard-hair, and bones were procured and analysed. Here, we present evidence that Brahe was not administered lethal doses of mercury and that neither acute nor chronic mercury poisoning was the cause of his death. The INAA results of *A. piriformis* suggest that his nasal prosthesis was most likely made of brass.