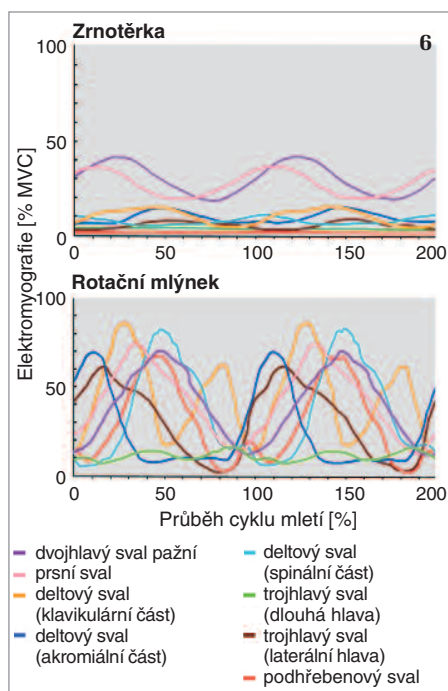


a levou stranu. Tím jsme získali stranové zapojení svalů z pravé a levé končetiny. Konečně jsme tedy mohli dostat odpověď na otázku, kterou jsme si kladli s přestávkami posledních 10 let.

Výsledky analýzy aktivity svalů nás svou průkazností překvapily. Nebylo pochyb, že jsme na správné stopě. U všech zkoumaných svalů se mletí na zrnотёрce projevilo symetrickou zátěží. Naopak svaly při mletí na rotačním mlýnku se zapojovaly asymetricky s různou mírou intenzity a s různou převahou pravé a levé strany. U rotačního mlýnku se nejvíce projevilo způsob zapojení končetin v rotaci, ale žádný ze způsobů rotace neznamenal přímou symetrickou svalovou aktivitu. Důležité bylo ale zjištění, že mletí na zrnотёрce znamená svalově velice jednotvárnou činnost, při které se maximálně zapojí v podstatě jen trojhlavý sval pažní. Naopak u rotačního mlýnku mletí záviselo na činnosti většího počtu svalů, které se zapojovaly různě, v závislosti na způsobu rotace horního kamene.

### Co s volným časem?

Analýzou aktivity svalů jsme potvrdili, že za symetrickým rozložением robustnosti pažní kosti žen prvňáků zemědělců by mohl být způsob mletí obilí. I toto zjištění nasvědčuje, jak významný dopad měla změna obživy s přechodem k zemědělství na vývoj lidské společnosti. Zajímavé je, že



se na pažních kostech projevila také intenzifikace zemědělství. Nízká efektivita drčení obilí na zrnотёрce znamenala pro ženy nejen, že trávily při mletí více času než ženy v době železné, ale také je příprava denního množství mouky stála více fyzických

6 Parametry analyzované pomocí elektromyografie (EMG) při výzkumu zapojení svalů během mletí na zrnотёрce (A) a rotačního mlýnku (B, při otáčení ve směru hodinových ručiček). MVC (Maximum Voluntary Contraction) – způsob standardizace maximální aktivity svalů pro srovnání mezi účastnicemi pokusu. Na grafech vidíme, že svaly se zapojují u zrnотёрky specializovaně jen u dvou svalů, kdežto zapojení svalů u rotačního mlýnku je variabilnější s větším výsledným počtem zapojených svalů. Orig. M. Hora

sil. Čas je ale možná to nejdůležitější, co zemědělský způsob obživy ovlivnilo. Příprava mouky na zrnотёрce zaměstnávala totiž ženu na podstatnou část jejího aktivního dne. Přechod k rotačnímu mlýnku naopak ženu uvolnil z jedné stereotypní činnosti, aby se mohla věnovat i jiným aktivitám. Možná právě přesun od zrnотёрky k jiným činnostem představoval okamžik, kdy se mohla opět plně projevit vrozená asymetrie s dominancí na pravé straně. Naštěstí nám zanechala v obou případech svou stopu.

*Příprava textu byla podpořena projektem Grantové agentury České republiky (GA ČR 14-22823S) a Grantové agentury Univerzity Karlovy (GA UK 1506314).*

Použitá literatura uvedena na webu Živa.

Jana Velemínská, Ján Dupej

## Virtuální antropologie a její přínos v oblasti biomedicínských a forenzních věd

Metodologie výzkumu biologické antropologie se během posledního století zaměřuje na hledání stále účinnějších nástrojů pro získávání nových informací v oblasti evoluce a variability člověka, ale také v praktičtěji zaměřených oborech, jako jsou biomedicína a forenzní vědy. Zavádění nových výpočetních technologií iniciovalo vznik nového konceptu morfometrie. Počítačová tomografie a 3D zobrazování poskytují anatomický popis vnějších, ale i vnitřních struktur, a tak lze sledovat problematiku přesahující témata řešená tradičním měřením. Navíc přístup zvaný geometrická morfometrie umožňuje vytvářet geometrické modely pro analýzy morfologických rozdílů vznikajících např. během ontogeneze v normě i patologii, a to v podobě virtuálních funkčních simulací, rekonstrukcí, různých vizualizačních schémat a morfingů (videa, která představují změnu – např. velikosti a tvaru jednoho objektu do objektu druhého). Spojení těchto nových nástrojů vedlo k vytvoření nového multidisciplinárního oboru virtuální antropologie, který sdružuje anatomické, biologické, matematicko-statistické a informačně-technologické principy výzkumu. Nyní je tomu již 10 let, co byla na katedře antropologie a genetiky člověka Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy založena Laboratoř zobrazovacích a analytických metod. Zabýváme se zde řadou témat právě za využití principů virtuální antropologie, nejčastěji ale řešíme problematiku spadající do oblasti biomedicínské a forenzní antropologie.

Virtuální antropologie je definována jako reálná antropologie, která studuje virtuální objekty (3D modely částí lidského těla). Mezi přednostmi tohoto oboru patří přístupnost ke všem anatomickým částem lidského těla včetně vnitřních struktur skrytých běžnému pozorování, jako jsou útvary uvnitř mozkovny, paranasální a jiné dutiny v lebce, kořeny zubů, dřevňové dutiny dlouhých kostí, srdce a jeho komory a mnohé další. Pomocí dnešních zobrazovacích metod (počítačovou tomografií – computer tomography, CT a mikroCT, a magnetickou rezonancí – MRI a mikroMRI) lze získat maximálně informativní kvantitativní data s vysokou rozlišovací schopností hraničící s histologií, se zachycením kompletní geometrie objektu. Další výhodou je stálá dostupnost virtuálních objektů na stolním počítači a přenosných paměťových médiích nebo jejich sdílení přes internet. Tento přístup přináší i velké možnosti při práci s daty, nové statistické a vizualizační postupy a v neposlední řadě výměnu dat za účelem zvýšení velikosti zkoumaného souboru.

Definice geometrické morfometrie (GM) spočívá ve fúzi geometrie a biologie (Živa 2006, 2: 54–56). Představuje metodologii pro získávání, zpracovávání a analýzu tvarových proměnných, které si zachovávají geometrickou informaci obsaženou ve dvou- nebo trojrozměrných datech. Nejčastější způsob, jak analyzovat tvar a velikost organismu nebo dílčích orgánů, je jejich zjednodušení na množinu metrických bodů (homologických landmarků) či křivky, a následná mnohorozměrná analýza. K zadávání množin bodů a křivek slouží např. kontaktní skener MicroScribe, celkový povrch snímaného objektu zaznamenává mnoho typů povrchových skenerů vyráběných za

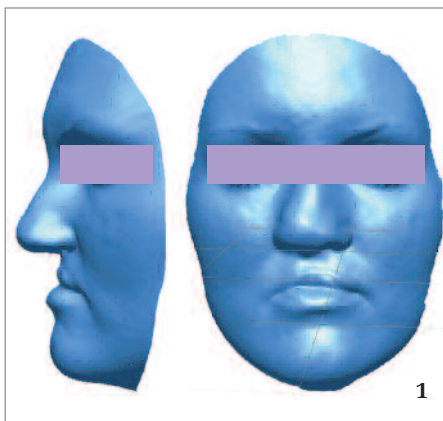
1 Povrchový virtuální model obličejě dospělé ženy s jednostranným rozštěpem rtu a patra demonstrující typické znaky pacientů s rozštěpovými vadami (operace rtu v 6 měsících života dítěte): kratší výška horní části obličejě, kratší a mohutnější nos, širší vzdálenost mezi očima, zkrácení hloubky horní čelisti, posun horní čelisti směrem dozadu, malá konvexita obličejě (plochý vzhled), snížená prominence nosu, výrazněji vystupující (prominující) brada.

2 Vývoj patrových segmentů v prvním roce života (A – několik dní po narození, B – ve stáří pěti měsíců, C – v 10 měsících) po neonatální operaci rtu u novorozenců s úplným jednostranným rozštěpem rtu a patra (a) a jednostranným rozštěpem rtu a patra s mostem (b). Během růstu dochází k vzájemnému přibližování obou nesrostlých segmentů k sobě.

Nejvýraznější růst odpovídá červené barvě na předních nespojených a částečně i zadních pólech budoucích alveolárních oblouků a patra, modrá barva ukazuje oblasti bez intenzivního růstu, od zelených tónů k červeným se intenzita růstu zvyšuje.

konkrétním účelem (např. skenování kostí, dentálních odlitků a zubů, obličejě, celého těla).

Práce ve virtuálním prostředí má, jak bylo řečeno, mnohé výhody, nese s sebou ale vyšší pořizovací náklady v podobě přístrojového a softwarového vybavení. V naší laboratoři pracujeme nejčastěji s povrchovými modely kostí, ale i lidského obličejě nebo jeho částí. Data ve formě povrchových sítí získáváme použitím laserových skenerů, dále pak faciálního čtyřkamerového skeneru a skeneru smartSCAN, které využívají strukturované světlo. Povrchové virtuální modely kostí se vytvářejí také segmentací objemových dat z CT snímků, a to nejčastěji pomocí softwaru Avizo. V současné době už existují speciální pokročilé metody geometrické morfometrie, kdy matematicky a statisticky analyzujeme kompletní povrchy celých objektů, sledujeme jejich variabilitu, průměrný tvar a velikost, různé skupiny objektů navzájem srovnáváme, modelujeme jejich změnu v čase, případně odhadujeme jejich budoucí morfologii.



Popisovanou metodologii z důvodů složitosti výpočtů nelze používat bez dostupnosti softwarového prostředí a výpočetní techniky. Dnes máme k dispozici softwarové balíčky, namátkou lze jmenovat např. programy PAST, MorphoJ, Morphueus. Nevýhodou je roztržitost těchto dílčích programů, kdy některé procedury poskytuje jeden software, další zase jiný, který ale má odlišné nároky na formát dat než předchozí apod. Univerzální nástroj pro analýzu tvaru, vyvinutý přímo pro potřeby virtuální antropologie, představuje Morphome3cs, který vznikl na základě mnohaleté spolupráce katedry antropologie a genetiky člověka PíF UK a Matematicko-fyzikální fakulty UK, konkrétně se skupinou zabývající se počítačovou grafikou. Jeho hlavním cílem je poskytnout rozhraní pro důležité fáze vědecké práce od organizace dat, digitalizace/měření, přes vizualizaci, manipulaci s geometrickými daty, statistickou analýzu až k vizualizaci výsledků statistické analýzy a přípravu výstupů k publikování. K výhodným vlastnostem systému patří zejména modularita, konfigurovatelnost, kdy lze systém neustále rozšiřovat o nové funkce a analýzy pomocí skriptování v jazycích R a Python. Uživatel má tak možnost použít množství předvolených analýz, nebo, pokud má zkušenosti s programováním, vytvořit pomocí populárního jazyka R vlastní analýzu.

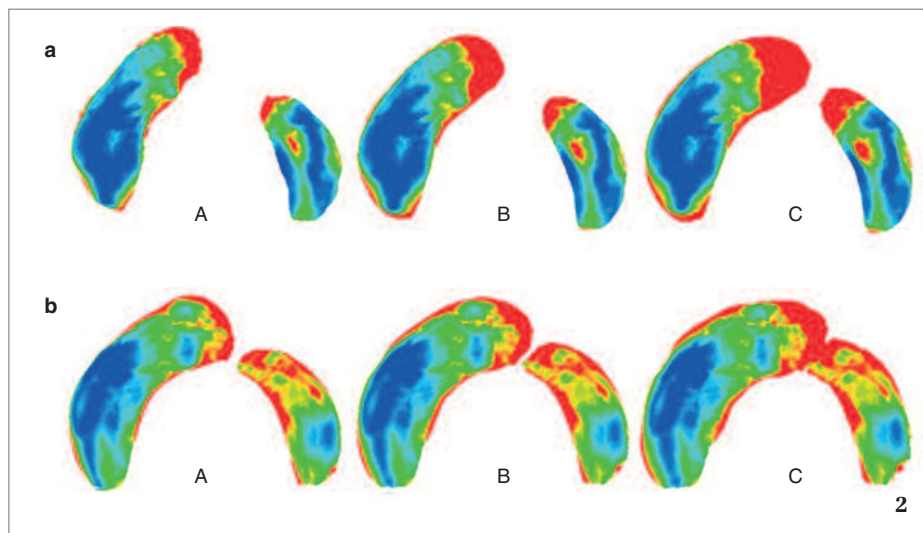
### Virtuální antropologie a biomedicína

Pro kvantitativní posuzování obličejové morfologie je jednou z nevhodnějších 3D zobrazovacích metod stereofotogrammetrie, a to díky vysoké přesnosti i rychlosti

snímání objektů. Využívá se v různých oblastech medicíny od plastické a rekonstrukční chirurgie přes ortodoncii, stomatologii, rehabilitační lékařství až po psychosociální vědy. Danou metodologií je možné zachytit určité struktury lidského těla staticky, ale také analyzovat jejich pohyb, např. morfologické změny obličejě při různých faciálních výrazech nebo pohyb rtů během řeči. Nejčastěji slouží ke sledování rozdílů mezi normou a patologií, k vizualizaci odchylek patologického vývoje obličejě u různých kraniofaciálních malformací, jako jsou např. rozštěpové vady (viz dále). Velké uplatnění mají při sledování účinku terapie různého druhu, ať už jde o operační metody, ortodontickou léčbu nebo protetiku. Stále častěji se virtuální modelování používá v traumatologii nebo plastické chirurgii při rekonstrukcích postižených částí těla, velmi žádané jsou predikční systémy, které odhadují budoucí vývoj částí lidského těla. Konkrétně byla v naší laboratoři sledována např. morfologie patra po chirurgické expanzi (roztažení), zabýváme se také stavbou a vývojem obličejě u některých vzácných syndromů (Williamsův, Noonanův a DiGeorgiův syndrom). V uplynulých letech jsme snad nejčastěji aplikovali metody virtuální antropologie při výzkumu a terapii následků orofaciálních rozštěpových vad.

Rozštěpové vady orofaciální oblasti patří k nejčastěji se vyskytujícím kraniofaciálním vrozeným vadám. Roční incidence všech typů orofaciálních rozštěpů je poměrně stabilní a kolísala okolo dlouhodobého průměru 1 : 588, tj. 1,7 případů na 1 000 živě narozených dětí. Po r. 2002 se počty pacientů s orofaciálním rozštěpem významně snížily, průměrná incidence se nyní pohybuje kolem 1,1 na 1 000 porodů. To je pravděpodobně z velké části způsobeno tím, že lze prenatálním ultrazvukovým vyšetřením přítomnost rozštěpu diagnostikovat a na první rodičů uměle přerušit těhotenství. Používaný název rozštěp odpovídá popisu tvaru této vady, ne však podstatě jejího vzniku. Embryologické a teratologické studie prokázaly, že ke spojení tkání horní čelisti, rtu anebo patra nedochází kvůli narušení komplikovaných a na sobě vzájemně závislých vývojových pochodů, které se při tvorbě obličejě uplatňují. Z hlediska embryologie se běžně používá rozdělení vad na dvě hlavní skupiny. Prvním typem rozštěpu struktur primárního patra je izolovaný rozštěp rtu v různém rozsahu od zářezu do retní červeně až po úplný rozštěp rtu včetně čelisti, který může být jednostranný nebo oboustranný. Druhou skupinu tvoří rozštěpové vady patra, opět v různém rozsahu. Společným výskytem obou vzniká nejzávažnější celkový kombinovaný rozštěp rtu a patra, jednostranný nebo oboustranný.

Léčba rozštěpových vad má dlouhou historii a prošla několika důležitými mezníky. Základním předpokladem úspěšné terapie kteréhokoli období zůstává chirurgova zkušenost a manuální zručnost. Terapie jako dlouhodobá záležitost probíhá v několika etapách od dětství až do dospělosti a je multidisciplinární. Rozštěpové vady ztěžují socializaci pacientů, kteří jsou stigmatizováni pooperačními jizvami s typickou deformitou obličejě, méně

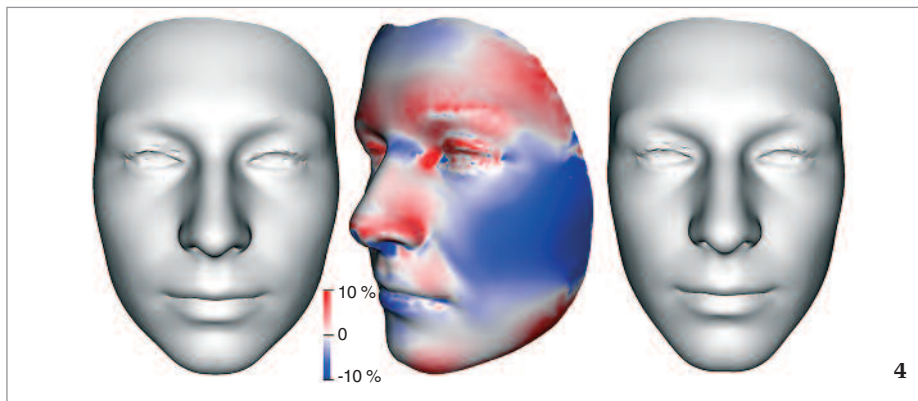
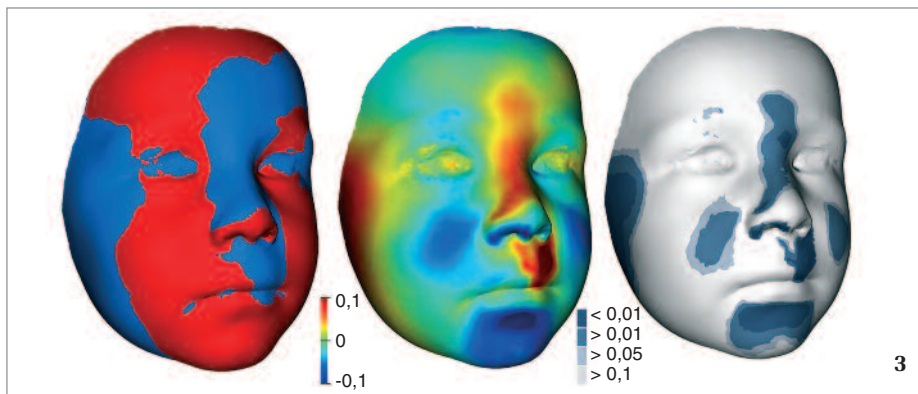


srozumitelnou řečí a často i určitým stupněm nedoslýchavosti v důsledku opakovaných zánětů středouší.

Pro pacienty s rozštěpy jsou typické některé základní poruchy skeletálního růstu. Patří sem menší šířka obličeje, kratší a mohutnější nos, naopak větší vzdálenost mezi očima. Snad nejtypičtějším znakem je zkrácení hloubky horní čelisti včetně jejího posunu dozadu, což má za následek plochý vzhled obličeje, zmenšenou prominenci nosu, zato naopak výrazněji vystupující bradu (obr. 1).

První operace, kterou pacienti podstupují, je cheiloplastika (plastická operace odstraňující defekt rtu), jejíž časová indikace provedení se pohybuje od několika dnů po narození do několika měsíců života dítěte. Za optimální dobu se nejčastěji považuje stáří okolo tří měsíců. Od r. 2010 ale jak lékaři, tak rodiče upřednostňují neonatální operace, kdy je nesrostlá štěrbina v oblasti měkkých tkání rtu rekonstruována zpravidla již během prvního týdne života dítěte. Od r. 2005 tuto operaci v České republice zavedl plastický chirurg Jiří Borský a nyní je upřednostňována před klasickým operačním protokolem. Při vhodné anestezii a odpovídající podpůrné léčbě neznámá větší riziko, přináší naopak lepší hojení jizvy, a tak již není zapotřebí dalších korektivních zákroků. Narození dítěte s viditelnou rozštěpovou vadou způsobuje rodičům velký psychický otřes. Po neonatální operaci si však z porodnice odnášejí novorozence bez daného stigmatu, dítě může být kojeno, lépe přibírá na váze. U rodičů je minimalizován problém přijmout vlastní dítě, u dětí se do budoucna snižuje výskyt pocitů méněcennosti, úzkostí vyžadujících péči psychologa. Otázkou zůstává, jaký má časný operační zákrok vliv na růst okolních tvrdých i měkkých tkání, na celkovou morfogenezi obličeje. A právě tady pomáhají metody virtuální antropologie, umožňující detailně sledovat růstové změny obličeje i patra – v té době ještě dvou nesrostlých segmentů, případně simulovat jejich další vývoj.

Operace rtu a následná operace patra mohou způsobit mediální kolaps takto posunutých nesrostlých segmentů doprovázený vývojem zúženého až špičatého tzv. gotického patra (když nejsou ploténky vodorovně vedle sebe, nýbrž se mediálně posunou, vzniká mezi nimi úhel menší než 180° – patro tvaru gotického oblouku, patro se tím také zúží; viz dále). Naše pilotní studie (Borský a kol. 2012) prokázala nejen úspěšnost neonatální cheiloplastiky po stránce estetiky a hojení jizev, také vývoj patrových segmentů v prvním roce života probíhal uspokojivě, přičemž jsme zaznamenali růst obou segmentů na předních nespojených i zadních pólech budoucího patra. Podle našich dalších výsledků byl pozorován zásadní vliv šířky rozštěpové štěrbiny na změny v průběhu růstu. Bylo zjištěno, že následkem neonatální operace rtu nedochází k redukci v hloubce horní čelisti ani k zúžení patra. Lze tedy předpokládat, že vlivem tlaku po operaci rtu během prvního roku života kolaps alveolárních výběžků nehrozí u žádného typu sledované vady (obr. 2). Pokud se týká vzhledu vnějšího obličeje, kontrolnímu zdravému jedinci se nejvíce podobá soubor



s izolovaným rozštěpem rtu, pro který je zároveň typická největší symetrie obličeje. Asymetrie se vzhledem ke kontrole vyskytuje především v oblasti nosu, filtra (tedy oblasti kožní části rtu mezi dolním okrajem nosu a ústní štěrbinou) a úst, u těžších typů vady se zvyšuje (obr. 3).

Abyste bylo možné posuzovat patologický vývoj obličeje, ať už z jakéhokoli terapeutického důvodu, je nezbytné znát morfologii dnešní zdravé populace. Ontogenetický vývoj současného člověka se proto sleduje jak z hlediska průměrných hodnot, tak variability. Např. obličej je zkoumán, jak roste a zároveň mění svůj tvar, již od narození do dospělého věku. Dokonce ani v dospělosti není stabilní, protože postupně podléhá senescenčním změnám (stárnutí). Za tímto účelem probíhá na našem pracovišti longitudinální sledování dětí a mládeže (tedy dlouhodobé sledování těch samých jedinců v různém věku), kdy získané časové řady virtuálních modelů obličeje mají široké uplatnění. Využíváme je nejen pro výzkum norma versus patologie, ale také jako biomedicínské normy pro pediatrickou praxi. V současné době např. vyvíjíme ve spolupráci s Matematicko-fyzikální fakultou UK software s implantovanými obličejovými standardy pro analýzu fyziognomie obličeje pacientů se vzácnými syndromy pro nemocnici v Praze-Motole. V neposlední řadě je na místě vyzdvihnout cenu těchto longitudinálních dat ve forenzním výzkumu, kde se v poslední době přednostně zaměřujeme na věkové změny obličeje v souvislosti s identifikací dlouhodobě pohřešovaných či hledaných osob.

#### Morfometrická analýza obličeje ve forenzní antropologii

Jedním z témat forenzní antropologie, která častěji využívají principy geometrické morfometrie, je návrh metod pro identifikaci

3 Fyziognomie obličeje u čtyřletých dětí s izolovaným rozštěpem rtu vzhledem ke kontrolnímu souboru zobrazená různým způsobem. Obr. vlevo ukazuje superprojekci (vzájemnou vzdálenost dvou povrchů po registraci) průměrného obličeje pacientů (modrá barva) do obličeje kontrolních stejně starých dětí (červená). Uprostřed je vizualizace rozdílů průměrného rozštěpového a kontrolního obličeje pomocí barevné mapy rozdílů – červená označuje místa, která mají pacienty s vadou větší či více vpředu (střední oblast čela, meziokční vzdálenost, oblast kořene nosu, postranní část obličeje, zjizvení horního rtu vlevo). Obr. vpravo znázorňuje oblasti, kde se obličej pacientů s izolovaným rozštěpem rtu významně liší od kontrolních. Oproti již jmenovaným místům sem patří i přední oblast tváře a brady, které jsou naopak výraznější u kontrolních jedinců bez postižení.

4 Průměrný ženský (vlevo) a mužský (vpravo) obličej ve věku 20 let a jejich superprojekce s vizualizovanými rozdíly (uprostřed). Červené odstíny znázorňují oblasti obličeje, které jsou větší nebo více vystupují dopředu u mužů, odstíny modré barvy označují naopak výraznější oblasti u žen. Z obrazové dokumentace tedy vidíme, že tvar ženského obličeje je spíše kulatější v porovnání s mužským, ženy mají kolmější čelo, méně výrazný zářez mezi čelní a nosními kostmi, dopředu vystouplejší tváře a plnější rty. Muži mají tvarově užší obličej s robustnější dolní částí, čelo s klenutějšími nadočnicovými oblouky ubíhá šikmo dozadu. Nos mužů je celkově větší a více prominující dopředu, muži se dále vyznačují mohutnější bradou a do stran více vyčnívající oblastí úhlů dolní čelisti.

jedince podle obličeje. Takové metody jsou potřebné např. při odhalování trestných činů zaregistrovaných videozáznamy, při simulaci stárnutí dospělých hledaných delikventů, posouzení právní odpovědnosti mladistvých nebo jejich ochrana při zneužití v pedopornografických materiálech. Odhad věku nezletilých podle fyziognomie představuje nový a velmi obtížný aspekt, neboť sekundární pohlavní znaky obličeje jsou velmi variabilní a nemusejí nutně odpovídat chronologickému (kalendářnímu) věku.

Geometrická morfometrie ve vztahu k identifikačním metodám lidského obličeje nabízí dva způsoby analýzy – analýzu tvaru odděleně od velikosti a společnou analýzu velikosti a tvaru, tzv. formy obličeje. Diskriminace a klasifikace pohlaví založená na formě bývá většinou úspěšnější než na základě samotného tvaru. Není-li velikost objektů zaznamenána (např. z důvodu nestandardizovaných fotografií), tvar by měl být samozřejmě sledován odděleně od velikosti.

K aspektům výzkumu morfologie obličeje patří také vývoj sexuálního dimorfismu (pohlavní dvojitvornosti – PD). PD tvoří součást variability člověka dané pohlavím,

**5** Vizualizace predikčního algoritmu pro období dospělého věku od 20 do 70 let, podle kterého lze omladit/zestárnout obličej v daném věkovém rozmezí. V horní řadě obličej ženy ve věku 29 let (vlevo), který podle algoritmu senescence žen (vpravo) zestárnul do věku 70 let života (uprostřed). Vizualizaci zestárnutí 23letého muže do věku 70 let ukazuje spodní řada. Je patrné, že muži prodělávají v daném věkovém intervalu výraznější morfologické změny než ženy – laterální rozšíření obličeje, méně vystupující horní ret. U žen dochází věkem k zešíkmení především centrální oblasti čela.

přičemž je výsledkem dlouhodobě působícího přírodního výběru a utváří se vlivem genetických, strukturálních a behaviorálních tlaků během vývoje. PD formy obličeje existuje již v raném prenatálním období, ale plně se rozvíjí až po pubertě. V raném fetálním období je vývoj hlavy silně ovlivněn morfogenezí mozku. PD se tak mění s věkem. Během postnatálního vývoje k utváření PD lebky postupně přispívají čtyři faktory. Prvním jsou počáteční, pravděpodobně geneticky předurčené prenatální tvarové rozdíly. Dále pak působí rozdíly spojené s velikostí a tvarem lebky, hypermorfóza (prodloužení času růstu a vývoje) u mužů a nakonec určitý stupeň odlišnosti ve směru mužských a ženských růstových trajektorií. Následný růst měkkých tkání obličeje zpravidla kopíruje skeletální podklad.

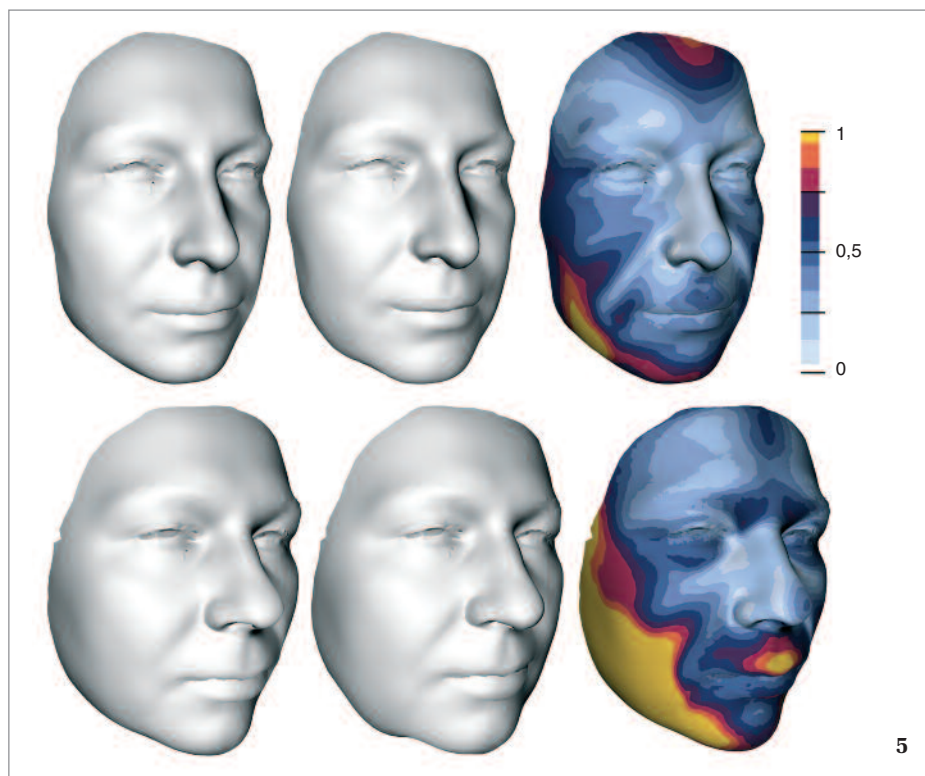
V prenatálním období se lidský obličej utváří pod vlivem nejméně dvou faktorů. Patří sem chromozomální určení pohlaví a prenatální prostředí. Rané hormonální prostředí s vysokým obsahem fetálního testosteronu koresponduje s poněkud robustnějším (mužským) tvarem obličeje, zatímco vysoká hladina fetálního estrogenu odpovídá gracilnějšímu (ženskému) tvaru. V postnatálním období má testosteron vliv na řadu obličejových znaků. Ve většině věkových intervalů byla nalezena statisticky významná PD jak pomocí metodologie založené na lineárních rozměrech, tak na základě měření povrchových a objemových dat, přičemž hodnoty pro mužské pohlaví byly vyšší. Výjimku tvořil interval 11–12 let věku, což je v souladu s ranějším nástupem puberty u dívek. Řada dalších studií prokázala, že se chlapci a dívky zjevně neliší v morfologii obličeje až do 13 let. Ve věku 15 let mají dívky oči více povrchově situované a také výraznější tváře než chlapci. Ti mají naopak v průměru výraznější nos. V období puberty dochází u mužského pohlaví k celkovému protažení obličeje, oči se tak relativně zmenšují, zvětšuje

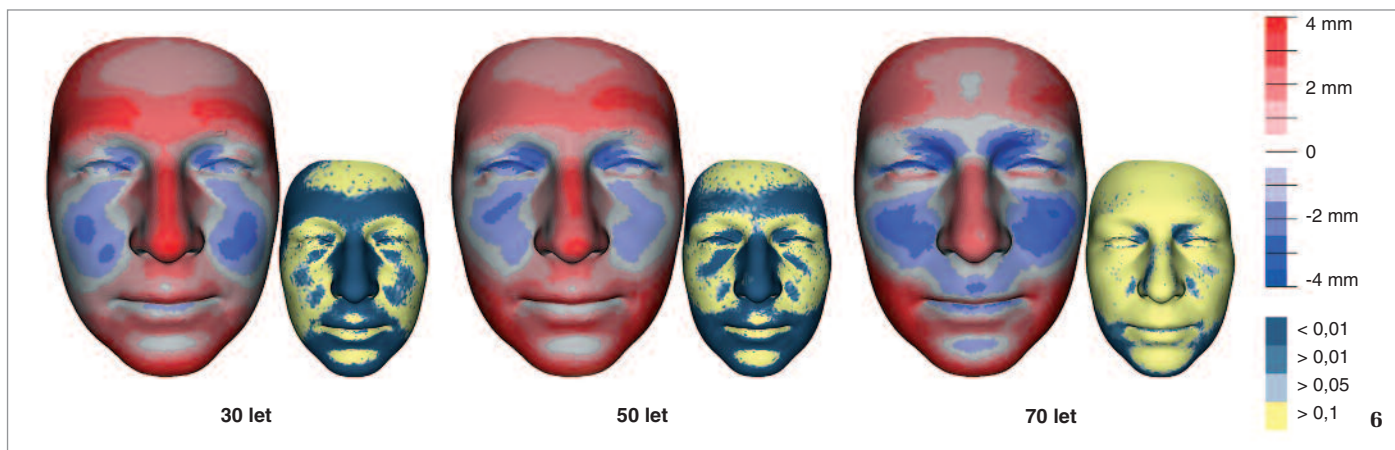
se nos, je intenzivnější boční růst lícní kosti a dolní čelisti (zvláště brady). Růst nadočnicových oblouků a prodloužení spodní části obličeje způsobují, že obličej nabývá robustnějšího tvaru a definitivního dospělého mužského vzoru. Vliv estrogenu u dívek vede naopak k zaoblenému tvaru obličeje s výše položeným obočím, k méně robustnímu nosu, bradě a plnějším rtům charakteristickým pro dospělé ženy (obr. 4). Důležitým sexuálně dimorfním rozdílem je velikost a uspořádání kostního podkladu nosu, nosní dutiny a nosohlтанu, čímž vznikají rozdíly i v jiných topografických strukturách obličeje. Tyto rozdíly byly interpretovány v souvislosti s fyziologicky většími požadavky na přísun kyslíku u mužů, což mohlo ovlivnit pohlavní dvojitvornost oblasti středního obličeje.

V naší laboratoři jsme se v poslední době zaměřili na longitudinální vývoj PD obličeje ve věku od 12 do 15 let, tedy v pubertě. Růstové trajektorie chlapců a dívek byly velmi podobné, chlapci v daném období prodělávali výraznější vývojové změny. Sexuální dimorfismus formy obličeje se signifikantně lišil až ve věku 15 let, v žádné věkové kategorii nebyl prokázán rozdílný tvar v daném věkovém rozmezí. Pro forenzní praxi byl vyvinut predikční algoritmus pro období adolescence i dospělého věku, na jehož základě lze omladit/zestárnout obličej v příslušném věkovém intervalu (obr. 5). Další věkovou kategorií, kterou jsme se v souvislosti se stárnutím současné populace zabývali, je dospělost a změny obličeje během stárnutí. Zajímalo nás, zda muži i ženy stárnou stejným způsobem a stejně rychle a zda se PD obličeje s věkem mění či ne. Trajektorie stárnutí mají u obou pohlaví téměř shodný průběh, avšak u mužů je trajektorie delší, což znamená výraznější projev senescenčních změn než u žen. Mezi nejpatrnější změny spojené s věkem patřilo zakulacení obličeje (především rozšíření jeho dolní části), přibývání a prohlubování kožních rýh a vrásek, rozšiřování nosu po celé délce a fragmentace linie dolní čelisti. U žen bylo v starších věkových kategoriích pozorováno rychlejší zmenšení velikosti obličeje, což se přičítá rychlejšímu úbytku podkožního tuku. Nejvýraznější senescenční změny byly zaznamenány u nejstarších mužů s největším obličejem. Zajímavým poznatkem je, že sexuální dimorfismus obličeje dospělého člověka se s věkem snižuje, a to především v oblasti čela, nosu, dolního víčka a horního rtu (obr. 6).

#### Přínos objemových dat z počítačové tomografie

Již jsme uvedli, že prakticky do všech disciplín biologické antropologie proniká medicínská zobrazovací technika, jako je počítačová tomografie, magnetická rezonance apod. Získáváme tak cenná recentní data týkající se současné populace, nicméně přístroje můžeme využívat také pro skenování suchých koster včetně z antropologického hlediska tak důležité dentice. V případě snímání živých lidí zpracováváme výhradně snímky pořizované z terapeutických důvodů, kdy je zapotřebí vyžádat informovaný souhlas pacienta a zpracování dat je pak anonymní. Na





základě mikroCT snímků zubů především minulých populací lze rekonstruovat detailní virtuální modely zubů pro zjišťování rozměrů, ale i objemu či povrchu jednotlivých zubních tkání. Např. tloušťka zubní skloviny je evolučně plastickým znakem pod genetickou kontrolou, který poskytuje funkční odpověď na změnu stravy. Má tedy souvislost s biomechanikou žvýkání, kdy tenčí sklovina znamená konzumaci měkčí stravy a silnější sklovina stravu tvrdou, s velkým stupněm abrazivity. Vnější reliéf virtuálních modelů zubů je rovněž vhodný pro studium abraze (obroušení) chrupu nebo hypoplazie (ztenčení) zubní skloviny.

Virtuální modely hlavy pořízené na základě CT snímků umožňují měření tloušťky měkkých tkání obličeje, nebo naopak segmentaci lebky pro sledování sexuálního dimorfismu, variability současného člověka pro srovnání s populacemi prehistorickými i historickými. Také sledování asymetrie lebky včetně nebo bez měkkých tkání není samoúčelné. Jedním z nejdůležitějších faktorů způsobujících směrovou asymetrii lebky (u většiny populace je konstantně vyvinutější jedna strana než druhá) je mastikace (žvýkání), která bývá častější na pravé straně obličeje a dává se do souvislosti se způsobem výživy dané populace. Naopak vyšší frekvence flukuační asymetrie (menší, nesměrované náhodné odchylky od symetrie) jsou výrazem vývojové nestability organismu a signalizují, že se tyto jedinci pravděpodobně vyvíjeli za nepříznivých životních podmínek (nedostatek výživy, špatný zdravotní stav).

Hodnoty tloušťky měkkých tkání v konkrétních bodech obličeje mají své tradiční

využití při rekonstrukci podoby na základě lebky, které jsme v r. 2016 publikovali jako standardy současné české populace (Drgáčová a kol.). Výsledkem měření byly průměrné hodnoty (obr. 7) včetně ukazatelů variability pro jednotlivé věkové kategorie mužů a žen. Průměrné hodnoty se mohou lišit i podle tělesné stavby jedince na základě naměřeného indexu tělesné hmotnosti (Body Mass Index, BMI), jehož hodnota je pro výslednou podobu obličeje důležitá.

Metoda kraniofaciální rekonstrukce se používá k tvorbě podoby historicky známých osobností i anonymních jedinců v bioarcheologii, při forenzním vyšetřování slouží jako prostředek napomáhající identifikaci, není však metodou vedoucí přímo k pozitivní identifikaci. Čelí kritice pro svou malou spolehlivost výsledků, přestože se v dnešní době upřednostňují moderní počítačové rekonstrukční postupy, kde je možnost zásahu do výsledné podoby stále potlačovanější, čímž se snižuje míra subjektivity. Navzdory tomu se tato metoda využívá v případech, kdy nelze aplikovat jiné způsoby identifikace.

Ve virtuální antropologii jsou vysoce ceněny celotělové snímky lidí získané počítačovou tomografií, které bývají nejčastěji pořizovány z důvodu angiografie (rentgenologického vyšetření cév). Za použití příslušných softwarů (Avizo, Morphome3cs) poskytují přesnou informaci nejen o vnější a vnitřní (splanchnologie) morfologii, ale také vstupní data pro segmentaci tělesného složení jednotlivce (rozdělení na kostní, svalovou a tukovou tkáň). Jelikož si kostní tkáň po celý život člověka zachová

6 Vizualizace vývoje sexuálního dimorfismu v průměrném věku 30, 50 a 70 let. Větší obličeje ukazují znaky pohlavně dimorní ve prospěch mužů (červená barva) a žen (modrá).

Menší obličeje zobrazují mapy signifikance, kde odstíny modré barvy znázorňují oblasti s průkaznými rozdíly mezi mužským a ženským pohlavím.

Z těchto žlutomodrých map zřetelně vidíme, že sexuální dimorfismus obličeje se s věkem výrazně snižuje.

7 Segmentace lebky na základě snímků z počítačové tomografie hlavy člověka. Měkké tkáně jsou znázorněny průsvitně jen na části lebky a pomocí barevné mapy je odstupňována tloušťka měkkých tkání, zásadní pro rekonstrukci obličeje podle lebky (vlevo pohled zepředu, vpravo ze strany).

Všechny orig.: J. Dupej a J. Velemínská

vá schopnost remodelace, hutnost a rozložení kompaktní kostní hmoty dlouhých kostí odráží pohybovou aktivitu jedince (bližší viz článek na str. 253). Zároveň se formuje i pod vlivem celkového zatížení jednotlivých kostí, a tak objem svalstva a tukové tkáně včetně jejich lokalizace v příslušném tělesném segmentu s tloušťkou kompakty kosti koreluje. Z tohoto vztahu vychází náš další výzkum spadající do oblasti forenzních věd a bioarcheologie, který je zaměřen na vývoj algoritmu odhadu hmotnosti člověka na základě morfologie kortexu dlouhých kostí (hutné kostní tkáň celé kosti).

Virtuální antropologie je tedy perspektivní obor, který vedle genetiky, molekulární antropologie, vývojové biologie a histologie patří mezi výrazné metodologické přístupy současnosti. Její uplatnění je širší, než jsme nastílnili v tomto přehledovém článku, některé další bioarcheologické i osteografické morfometrické principy a studie jsou zmíněny v jiných článcích uvedených v tomto čísle. Podrobnější možnosti oboru a směry výzkumu na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy mohou být postupně rozpracovány do článků v příštích ročnících Živy.

Výzkum některých témat je financován z projektu Grantové agentury Univerzity Karlovy (např. GA UK 230516).

Seznam citované a doporučené literatury najdete na webových stránkách Živy.

