

Diagnóza smrti mozgu a úloha zobrazovacích metód

MUDr. Martin Vorčák, Ph.D.¹, MUDr. Hubert Poláček, PhD.², MUDr. Zuzana Gešvandtner Trabalková, MPH¹, MUDr. Daniel Evin, PhD.², MUDr. Martin Števík, PhD.¹, doc. MUDr. Kamil Zeleňák, PhD., FCIRSE¹

¹Rádiologická klinika JLF UK a UNM, Martin

²Klinika nukleárnej medicíny JLF UK a UNM, Martin

Smrť mozgu zostáva klinickou diagnózou, vo väčšine prípadov založenou na klinickej diagnostike. Doplnkové testy vrátane zobrazovacích vyšetrení sa používajú na potvrdenie absencie cerebrálnej perfúzie, keď sú klinické nálezy nejednoznačné. Zobrazovacie metódy ako DSA, perfúzna scintigrafia a transkraniálny Doppler môžu poskytnúť kľúčové, zákonom vyžadované údaje na podporu diagnózy. Napriek prebiehajúcim snahám neexistuje celosvetový konsenzus o optimálnom doplnkovom teste a prax sa líši podľa regiónov. Moderné vyšetrenia ako CT angiografia (CTA), MR techniky, CT perfúzia a časovo invariantná CTA ponúkajú stále presnejšie výstupy. Je však potrebná ich ďalšia validácia, zvlášť v prípade pediatrických pacientov. Včasná diagnóza smrti mozgu minimalizuje zbytočné výkony a umožňuje následný efektívny transplantčný program.

Kľúčová slova: smrť mozgu, konfirmačné testy, DSA, scintigrafia, CTA.

Brain death diagnosis and the role of diagnostic imaging

Brain death remains a clinical diagnosis, based mainly on clinical criteria. Ancillary tests, including diagnostic imaging, are used to confirm the absence of cerebral perfusion when clinical findings are inconclusive. Imaging methods like DSA, perfusion scintigraphy and transcranial Doppler can provide critical, legally required data to support the diagnosis. Despite ongoing efforts, there is no global consensus on the optimal ancillary test, with practices varying by the region. Modern techniques like CT angiography (CTA), MR imaging, CT perfusion and time-invariant CTA, offer increasingly accurate outcomes. However, further validation is needed, particularly for pediatric patients. Early brain death diagnosis is crucial to avoid unnecessary interventions and to support timely organ transplantation.

Key words: brain death, ancillary tests, diagnostic imaging, DSA, scintigraphy, CTA.

Úvod

Napriek etickým a náboženským otázkam je koncept smrti mozgu v súčasnosti široko akceptovaný, či už konceptuálne, alebo právne, hoci sa protokoly pre jeho definíciu medzi jednotlivými krajinami líšia (Martinková et al., 2015). Klinické určenie smrti mozgu v Slovenskej republike vyžaduje stanovenie ireverzibilnej etiológie kómy, absenciu reflexov mozgového kmeňa a apnoe. Zároveň sa

vyžaduje absencia dočasných alebo trvalých kontraindikácií v prípadoch, ako sú akútna intoxikácia, kombinácia miechovej lézie a intoxikácie, primárna hypotermia, metabolický a endokrinný rozvrat (zákon č. 576/2004, odborné usmernenie č. 28610/2006-OZSO).

S cieľom formulovať konsenzuálne vyhlásenie odporúčaní týkajúcich sa určenia smrti mozgu vznikla iniciatíva *The World Brain Death Project* (WBDP) (Greer et al., 2020), kto-

DECLARATIONS:

Declaration of originality:

The manuscript is original and has not been published or submitted elsewhere.

Ethical principles compliance:

The authors attest that their study was approved by the local Ethical Committee and is in compliance with human studies and animal welfare regulations of the authors' institutions as well as with the World Medical Association Declaration of Helsinki on Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects adopted by the 18th WMA General Assembly in Helsinki, Finland, in June 1964, with subsequent amendments, as well as with the ICMJE Recommendations for the Conduct, Reporting, Editing, and Publication of Scholarly Work in Medical Journals, updated in December 2018, including patient consent where appropriate.

Conflict of interest:

Not applicable.

Consent for publication:

Not applicable.

Cit. zkr: *Neurol. praxi.* 2025;26(2):122-128

<https://doi.org/10.36290/neu.2025.005>

Článok prijat redakci: 5. 11. 2024

Článok prijat k publikaci: 17. 1. 2025

MUDr. Martin Vorčák

martin.vorcak@uniba.sk

rá by mala slúžiť na usmernenie odborných spoločností a krajín pri revízii alebo vypracovaní diagnostických protokolov a postupov. Zaoberá sa aj odporúčaniami a návrhmi doplnkových vyšetrovacích metód (Greer et al., 2020). Väčšina doplnkových vyšetrení je navrhnutá buď na potvrdenie absencie cerebrálneho prietoku krvi, alebo neurofyzologickej aktivity mozgu. Výber realizovaného doplnkového vyšetrenia závisí od lokálnych zákonov, technickej a personálnej dostupnosti. Preferencia konkrétneho vyšetrenia nemá celosvetový konsenzus, hoci je zrejmy posun k zobrazovacím vyšetreniam, ktoré potvrdzujú absenciu cerebrálneho prietoku krvi (Greer et al., 2020). V ďalšom texte poskytneme opis techník zobrazenia cerebrálneho prietoku, ich porovnanie a aktuálne používanie.

Neurozobrazovacie vyšetrenia v diagnostike smrti mozgu

V jednotlivých krajinách sú rozdiely v úlohe neurozobrazovacích metód, pričom viacerí odborníci podporujú ich rutinné vykonávanie. Podporné argumenty takéhoto postupu uvádzajú, že dodatočné testy posilnia výsledky klinického vyšetrenia a aj apnoického testu a tým zvýšia presnosť diagnostiky smrti mozgu. Nedávne preskúmanie 78 národných protokolov zistilo, že 28 % z nich uvádza povinnosť vykonať doplnkový test na posúdenie intrakraniálnej elektrickej aktivity a/alebo prietoku krvi (Lewis et al., 2020). Rovnako aj v Českej republike je podľa legislatívy konfirmačný test potrebný, okrem prípadov s objektívne dokázanou ťažkou štrukturálnou infratentoriálnou léziou (zákon č. 44/2013 Sb.).

Druhá skupina sa prikláňa k názoru, že rutinné konfirmačné vyšetrenia nie sú vo väčšine prípadov potrebné (Greer et al., 2023). Tento názor je podporený skutočnosťou, že senzitivita ani špecifita diagnostických testov na posúdenie absencie intrakraniálnej elektrickej aktivity alebo prietoku krvi nie je stopercentná. V Slovenskej republike, ako aj v ďalších krajinách sa preto konfirmačné vyšetrenia využívajú iba v prípadoch s nejednoznačnými výstupmi klinických testov alebo pri kontraindikáciách na klinické určenie smrti mozgu (zákon č. 576/2004; Greer et al., 2020, 2023; Silver, 2021). Tieto prípady vyplývajú z limitácií a kontraindikácií jednotlivých klinických tes-

tov, ako napríklad anoftalmia, závažný edém orbít, sklér či chemóza, fraktúra bázy a petróznej kosti s poškodením vnútorného alebo stredného ucha, preexistujúca amyotrofická laterálna skleróza alebo závažná senzorická neuropatia, ťažká trauma tváre, ako aj trauma frenického nervu pri vysokých úrazoch krčnej miechy, Lazarov príznak, Babinského príznak a iné prípady bližšie uvedené v odkazoch (Martinková et al., 2015; Greer et al., 2020). V zahraničí sa použitie testu pripúšťa aj ako podpora na pochopenie klinického potvrdenia smrti mozgu pre rodinu zosnulého, ktorá nerozumie alebo neprijíma túto diagnózu (Greer et al., 2020; Thomas et al., 2023). Aj keď je doplnkové vyšetrenie jednoznačne indikované, neurologické vyšetrenia a apnoický test by sa mali vykonať v čo možno najväčšom rozsahu a všetky zistenia musia byť v súlade s diagnózou smrti mozgu (Greer et Lewis et Kirschen, 2024).

Young et al. opísali vlastnosti ideálneho doplnkového testu (Young et al., 2006). Spoľahlivý test by mal spĺňať všetky kritériá uvedené v tabuľke 1. Neurozobrazovacie metódy používané ako konfirmačné testy zastavenie mozgovej cirkulácie pri diagnóze smrti mozgu zhrňa tabuľka 2.

Spoločnou nevýhodou testov smrti mozgu založených na dôkaze zlyhania mozgovej cirkulácie sú situácie, pri ktorých zvýšenie intrakraniálneho tlaku nemusí viesť k zastaveniu cerebrálneho prietoku. Takýto jav môže nastať pri vyššie spomínanej katastrofálnej patológii mozgového kmeňa, alebo alternatívne, keď je zvýšenie tlaku nejakým spôsobom kompenzované. Vďaka otvoreným fontanelám a mäkkej deformovateľnej lebke je takýto jav bežný u dočiat. Spadajú sem tiež poúrazové stavy lebky umožňujúce dekompresiu, ale aj chirurgické dekompresné výkony a zavedenie komorovej drenáže. V dôsledku týchto situácií môže byť prietok v mozgu udržaný aj napriek nefunkčnosti samotného parenchýmu. Takéto

Tab. 3. Prehľad zákonom stanovených potvrdzujúcich vyšetrení v Českej a Slovenskej republike

Česká republika	Slovenská republika
Angiografia mozgových tepien	Angiografia mozgových tepien
Perfúzna scintigrafia mozgu	Perfúzna scintigrafia mozgu
Počítačová tomografická angiografia (CTA)	Sluchové kmeňové evokované potenciály (BEAP)
Transkraniálna dopplerovská ultrasonografia	Elektroencefalografia
Sluchové kmeňové evokované potenciály (BEAP)	

*hrubým písmom sú vyznačené testy dokazujúce zlyhanie mozgovej cirkulácie

Tab. 1. Ideálne vlastnosti konfirmačného testu v diagnostike smrti mozgu

- Keď test potvrdí smrť mozgu, nemal by byť nikto, kto by sa zotavil alebo mal potenciál na zotavenie. Nemali by existovať žiadne falošne pozitívne výsledky.
- Test by mal byť sám o sebe dostatočný na určenie smrti mozgu.
- Test by nemal byť náchylný na vonkajšie alebo vnútorné rušivé faktory, ako sú účinky liekov a metabolické poruchy.
- Test by mal mať štandardizovanú metodiku, techniku a klasifikáciu výsledkov.
- Test by mal byť lacný, bezpečný a ľahko aplikovateľný. Testovanie by nemalo byť obmedzené len na niekoľko terciárnych akademických centier. Malo by byť možné ho aplikovať v akomkoľvek oddelení intenzívnej starostlivosti a metodika by mala byť ľahko zvládnuteľná.

Tab. 2. Súhrn konfirmačných testov zlyhania mozgovej cirkulácie pri diagnóze smrti mozgu

- Digitálna subtrakčná angiografia
- Scintigrafické vyšetrenie mozgu
- Angiografia počítačovou tomografiou, CT perfúzne vyšetrenie
- Magnetická rezonancia, magnetická rezonančná angiografia, MR perfúzne vyšetrenie
- Transkraniálna dopplerovská sonografia

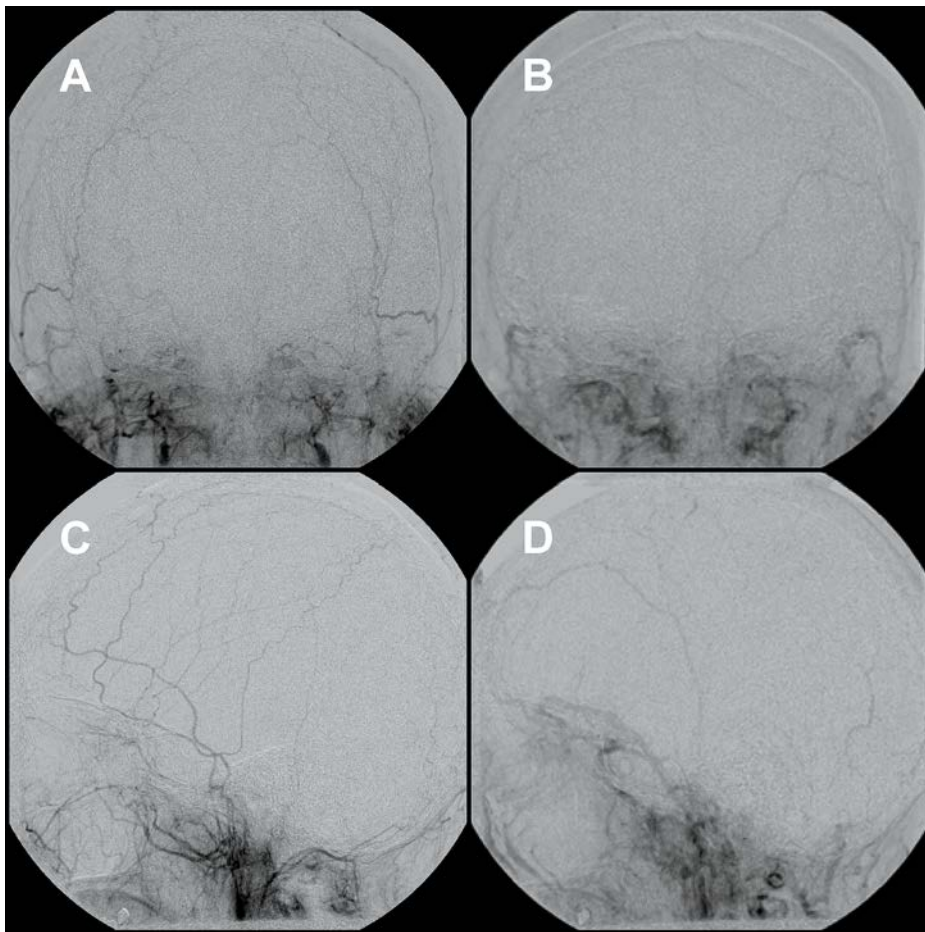
situácie vyústia k falošne negatívnym výsledkom vyšetrení, je nutné ich preto chápať a posudzovať v kontexte kliniky, prípadne zvážiť ďalšie možnosti na potvrdenie smrti mozgu (Heran et Heran et Shemie, 2008).

Prehľad zákonom stanovených potvrdzujúcich vyšetrení na Slovensku a v Čechách je zhrnutý v tabuľke 3.

Digitálna subtrakčná angiografia (DSA)

Digitálna subtrakčná angiografia, sa napriek stúpajúcemu trendu neinvazívnych konfirmačných vyšetrení, stále považuje za zlatý štandard v dokazovaní smrti mozgu. Jej realizáciu navrhuje aj iniciatíva WBDP a posledné odporúčania z USA (Greer et al., 2020, 2023). Naopak, najnovšie kanadské smernice jej použitie neodporúčajú (Shemie et al., 2023). Môže byť realizovaná nástrekom cez

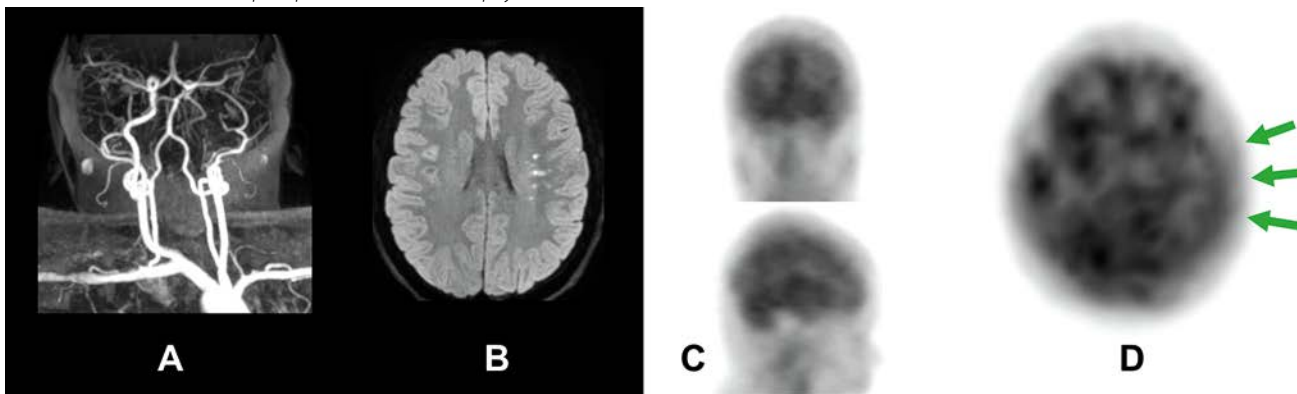
Obr. 1. DSA vyšetrenie pri klinickom podozrení na smrť mozgu: AP snímka v arteriálnej (A) a venóznei fáze (B), laterálna snímka v arteriálnej (C) a venóznei fáze (D). Na snímkach je viditeľná náplň vetiev arteria carotis externa, bez náplne v arteria carotis interna a jej vetvách a tiež tepien zadného povodia, čím vyšetrenie spĺňa kritériá zlyhania mozgovej cirkulácie



pigtail katéter v oblasti aortálneho oblúka alebo nástrekom jednotlivých mozgových tepien. V Slovenskej a Českej republike existujú metodické pokyny na jej realizáciu, ktoré sa od seba podstatne nelíšia. Angiograficky je podľa nich smrť mozgu potvrdená, ak sa kontrastnou látkou plnia najviac prvé segmenty intrakraniálnych tepien. Tok v intrakraniálnom

segmente vnútornej krčnej tepny môže byť pozorovaný po oftalmický segment, pretože oftalmická tepna bude naďalej priechodná, aj keď je intrakraniálny tlak veľmi vysoký. V prípade, že smrť mozgu nebola angiografiou potvrdená, neodporúča sa opakovať vyšetrenie skôr než o 12 hodín (Angiografie – metodický pokyn, zákon č. 576/2004).

Obr. 2. Obrázok normálnej perfúzie mozgu 31-ročnej pacientky s uzáverom a. carotis interna vľavo po disekcii s neúplným, avšak dobre kolateralizovaným Willisovým okruhom a minimálnymi podkôrovými ischemickými zmenami: MR angiografia (A), MR difúzne vážený trase axiálny rez (B), sumárne scintigrafické obrázky spredu a z boku (C), reprezentatívny axiálny SPECT rez (D). Iba regionálna štatistická analýza potvrdila miernu poruchu kôrovej perfúzie v povodí a. cereberi media vľavo temporoparietálne – zelené šípky



Výhodou angiografie je vysoká – 100% špecificita (Paolin et al., 1995; Greer et al., 2020). Senzitivitu môže ovplyvniť tzv. stasis filling – stagnácia kontrastnej látky v proximálnych mozgových tepnách.

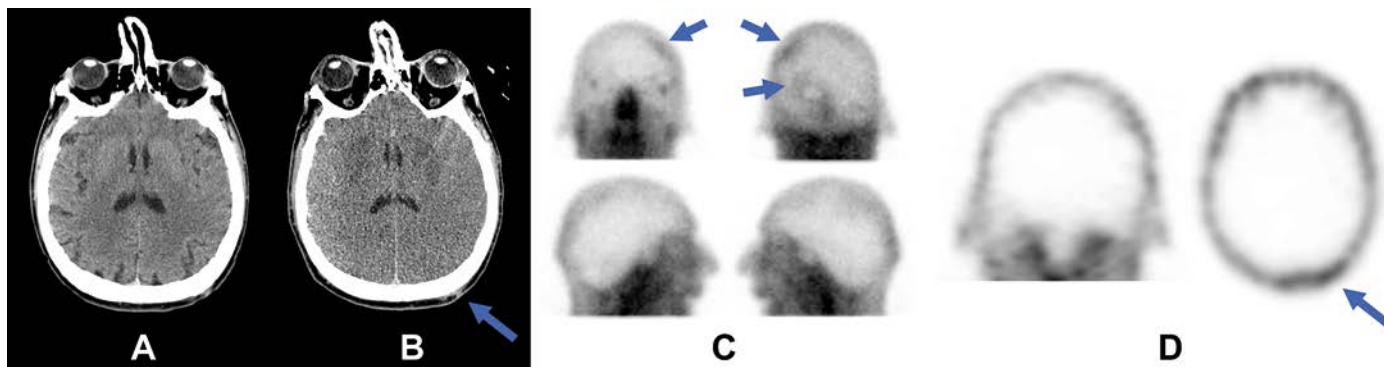
Nevýhody predstavuje invazivita vyšetrenia a aplikácia kontrastnej látky, ktorá môže predstavovať riziko pre pacientov s ochoreniami obličiek. Aplikácia vyšetrenia v situáciách s kompenzovaným intrakraniálnym tlakom (ako kraniektómie a vyššie uvedené klinické situácie) môže viesť k falošne negatívnemu výsledku. Realizácia procedúry vyžaduje skúseného intervenčného rádiológa a jej dostupnosť je preto v mnohých nemocniciach limitovaná.

Perfúzna scintigrafia mozgu a SPECT

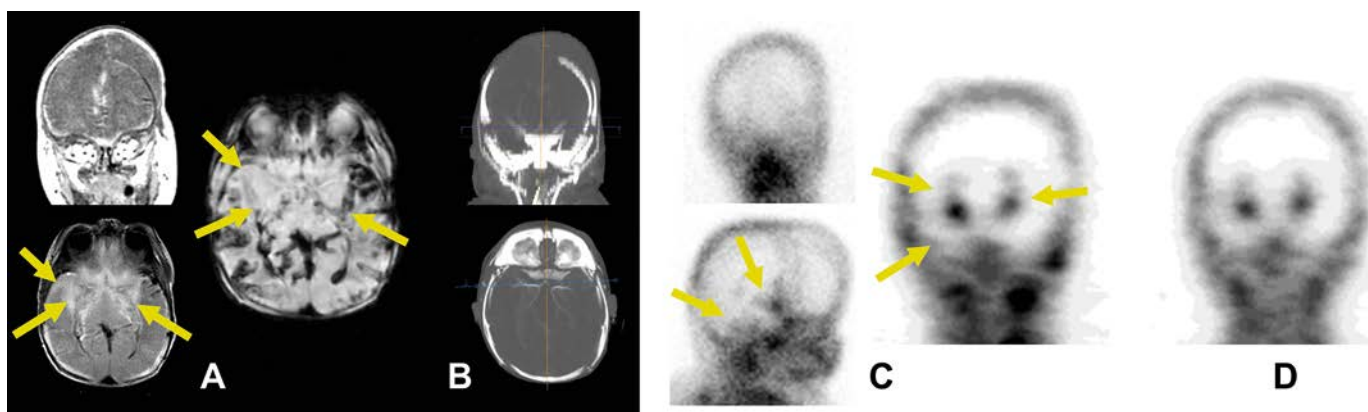
Desaťročia etablovaná metodika nukleárnej medicíny je v súčasnosti odporúčaná predovšetkým vo svojej statickej 2D a 3D zobrazovacej podobe, po intravenóznei aplikácii lipofilných rádiofarmák ^{99m}Tc-HMPAO alebo ^{99m}Tc-ECD vychytávajúcich sa v tkanive mozgu priamo úmerne perfúzii (Kapucu et al., 2009).

Výhodou rádionuklidového vyšetrenia je nezávislosť znázornenia funkčného parenchýmu od jeho elektrickej aktivity, ktorá môže vymiznúť iba prechodne napríklad pri intoxikácii liekmi alebo drogami (Nakagawa et al., 2012). Pre smrť mozgu je charakteristický edém nekrotického parenchýmu, ktorý spôsobuje zvýšenie intrakraniálneho tlaku nad úroveň krvného a tým úplné zastavenie perfúzie celého mozgu. Štruktúry mozgu a kmeňa tak v obraze absentujú a naopak výrazný je obraz lebky a okolitých mäkkých tkanív. Radiačná

Obr. 3. *Obraz smrti mozgu 49-ročného pacienta s absenciou perfúzie potvrdenou scintigraficky: ide o pacienta po traumatickej transversálnej lézii krčnej miechy so zastavením dýchania, po úspešnej kardiopulmonálnej resuscitácii, s rýchlym rozvojom areflexie a CT verifikovaného edému mozgu (A, B) v priebehu 2 dní, GCS 3. Apnoický test nebol realizovaný z dôvodu lézie miechy. Na planárnych perfúzných scintigramoch (C) vidieť typické vzory „hot nose“ aj „empty bulb“, vľavo parietookcipitálne sa však znázornila nejednoznačne zvýšená akumulácia – modré šípky. Tá zásluhou SPECT snímania (D) lokalizovala jednoznačne mimo priestoru mozgu, do oblasti traumatických reparačných zmien podkožia a lebky, nález teda potvrdil smrť mozgu*



Obr. 4. *Podkôrová perfúzia u novorodenca po ťažkej pôrodnej asfyxii z dôvodu ruptúry uteru matky, po úspešnej kardiopulmonálnej resuscitácii s následnou umelou pľúcnou ventiláciou, riadenou hypotermiou a katecholaminovou podporou: v priebehu prvého týždňa sa vyvinul klinický obraz hlbokoj areaktívnej kómy s vyhasnutím všetkých kmeňových reflexov, GCS 3. Počas ďalších 2 týždňov boli realizované opakované EEG a zobrazovacie konfirmačné vyšetrenia smrti mozgu. Napriek herniácii mozgu cez veľkú fontanelu a početným hemorágiám (A – MR MPR zobrazenie vo frontálnom, FLAIR a susceptibilita v axiálnom reze) CT angiografia ukázala prietok intrakraniálnym cievnym riečiskom (B). V planárnych aj 3D perfúzných SPECT obrazoch vidieť jednoznačnú akumuláciu v podkôrových štruktúrach spolu s reziduálnym obrazom kôry pravého temporálneho laloka (C, žlté šípky). Nález sa s odstupom 2 dní významne nezmenil (D). Dieťa zomrelo na sepsu necelé 2 týždne po prvom scintigrafickom vyšetrení pri stále zachovanej, hoci výrazne patologickej, EEG aktivite*



záťaž vyšetrenia je minimálna a v porovnaní s angiografickými metódami perfúzna scintigrafia nezaťažuje orgány potenciálneho darcu kontrastnou látkou.

Keďže perfúzna scintigrafia sa používa aj na hodnotenie porúch prekrvenia mozgu u bežných neurologických pacientov s normálnym intrakraniálnym tlakom, ako aj negatívnymi, prípadne nejednoznačnými MR a CT nálezmi vrátane angiografických (Obr. 2), jej výstupy musia byť jednoznačné už na základe kvalitatívneho hodnotenia, aby bola zabezpečená 100% špecifita pre prípady smrti mozgu. Kvalitatívne je na statických scintigramoch pri smrti mozgu zobrazená jednoznačná absencia perfúzie v celom intrakraniálnom priestore mozgu pri zachovanej perfúzii v lebke a okolitých mäkkých tkanivách, pripomínajúc tak žiarovku

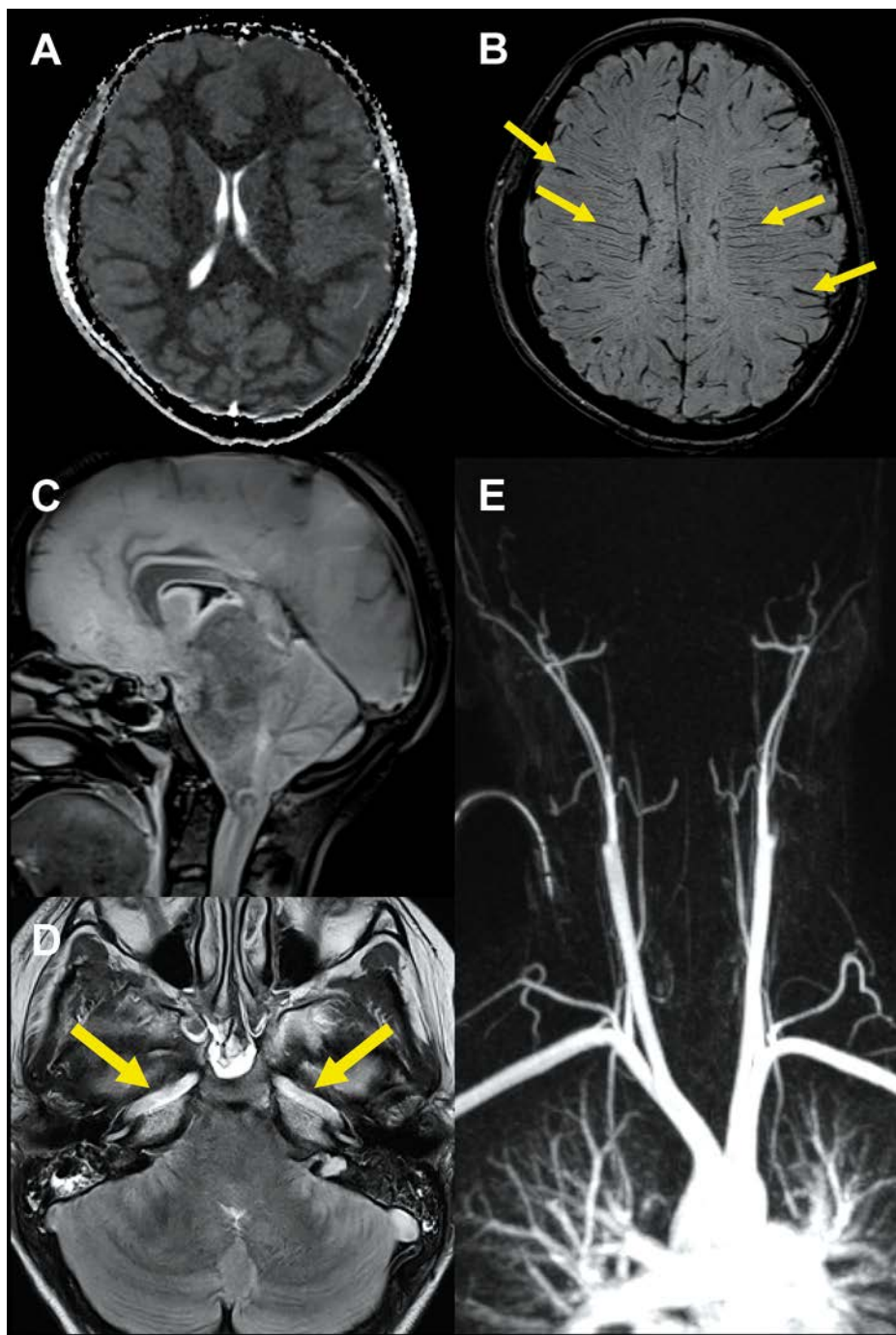
– príznak „empty bulb“. Rádiofarmakum sa naopak často vychytáva v abnormálne vysokých relatívnych koncentráciách v tkanivách zásobených a. carotis externa, hlavne okolo nosovej dutiny – príznak „hot nose“. Obidva príznaky sú zreteľné už v 2D (planárnych) záznamoch, ktoré by mali byť nasledované špecifickejšim SPECT snímaním (Obr. 3). Planárne záznamy totiž niekedy nedokážu spoľahlivo potvrdiť absenciu perfúzie v zadnej jame z dôvodu jej sumácie s prekrvenými štruktúrami splanchnokrania a krku, prípadne je obraz modifikovaný traumaticky podmieneným zvýšením prekrvenia mäkkých tkanív alebo skeletu hlavy. Trojrozmerné SPECT zobrazenie tieto prípady spoľahlivo odliší (Obr. 3).

Úskalia scintigrafie ako konfirmačného testu smrti mozgu spočívajú predovšetkým

v malom počte diagnostických pracovísk, ktoré vyšetrenie realizujú, navyše často bez pohotovostného režimu mimo obvyklého denného pracovného času.

V pediatickej populácii novorodencov a dojčiat môže byť vyšetrenie negatívne aj v prípade jednoznačného infaustného stavu, hlavne z dôvodu veľkej poddajnosti kalvy pri neuzavretých švoch a fontanelách (Sekar, 2007). Intrakraniálny tlak často nestúpne na úroveň, pri ktorej úplne zablokuje perfúziu najviac prekrvených typicky podkôrových štruktúr, čo vedie k ich zobrazeniu, a teda nesplneniu konfirmačného kritéria (Obr. 4). Podobné dôsledky môžu mať dekompresné alebo drenážne terapeutické procedúry u starších pacientov. U nich však nálezy väčšinou rýchlo progredujú k jednoznačnému obrazu absencie perfúzie a negatívne vyše-

Obr. 5. MR vyšetrenie u pacienta s potvrdenou smrťou mozgu: difúzne zníženie signálu na ADC mapách, edém mozgového tkaniva (A), SWI vážený obraz s obojstranným „transcortical“ a „transcerebral vein sign“ podmienený vyšším obsahom deoxyhemoglobínu pri zvýšenej extrakcii kyslíka z krvi (B), obraz okcipitálneho kónusu (C), chýbajúci „flow void“ pri chýbajúcom toku v arteria carotis interna (D), CEMRA vyšetrenie mozgových tepien – zobrazený prietok v arteria carotis externa s chýbajúcim prietokom v arteria carotis interna, mozgu a tepien zadného povodia (E)



trénie sa preto odporúča s niekoľkodňovým odstupom opakovať (Flowers et Patel, 2000; Zuckier et Kolano, 2008). Keďže boli publikované aj prípady so scintigraficky znázornenou perfúziou mozgu pri klinicky jednoznačnom dôkaze afunkcie mozgového kmeňa u pediatrických pacientov (Toffol et al., 1987), neexistuje na indikovanie tohto vyšetrenia u detí jednoznačný konsenzus.

Počítačová tomografia (CT)

Natívne CT vyšetrenie mozgu môže poskytnúť dôkazy o nezvratnom poškodení mozgu a o primárnej intrakraniálnej udalosti, ktorá spôsobila smrť mozgu. Keďže CT je všeobecne dobre dostupné, často sa používa ako počiatočné vyšetrenie u pacientov v kóme. Americké odporúčania zahŕňajú neurozobrazovanie u komatóznych pacientov ako ne-

vyhnutný predpoklad na hodnotenie smrti mozgu (Greer et al., 2023). V dôkaze smrti mozgu však má natívne CT ako konfirmačný test nízku špecifickosť a senzitivitu (73 % a 32 %) a na tento účel ho teda nie je možné použiť (MacDonald et Stewart-Perrin et Shankar, 2018).

CT angiografia (CTA)

CTA sa ujala ako vyvíjajúca sa neinvazívna technika na dôkaz zlyhania mozgovej cirkulácie. Využívajú ju mnohé európske aj svetové krajiny (Austrália, Česko, Francúzsko, Holandsko, Kanada, Nemecko, Poľsko, Španielsko, Švajčiarsko, Veľká Británia) (Lewis et al., 2021). V Českej republike jej realizáciu určuje metodický pokyn (Heřman, 2020). Naopak, niektoré odporúčania sa použitiu CTA vyhýbajú a navrhujú sa jej venovať ako potenciálnemu testu po podrobnejšom preskúmaní (Greer et Lewis et Kirschen, 2024; Cohen et Katvan et Ashkenazi, 2022). Jej výhody sú najmä rýchlosť, neinvazívnosť, dostupnosť, technická a finančná nenáročnosť. Rovnako má vysoké priestorové a časové rozlíšenie a je relatívne nezávislá od hodnotiaceho lekára. Nevýhodou je rovnako ako pri DSA potreba podania kontrastnej látky. Vyšetrenie môže mať navyše veľké rozdiely v senzitivite z dôvodov veľkej nesúrodosti pri realizácii, protokoloch a aj hodnotení vyšetrenia medzi jednotlivými diagnostickými centrami.

V novších publikáciách dosahuje senzitivita v závislosti od použitého skórovacieho systému 67,1–96,3 % (Bohatyrewicz et al., 2021), pričom najvyššia hodnota bola vo viacerých publikáciách zaznamenaná pri používaní novších, 4-bodových systémov ako modifikované Frampas skóre (Bohatyrewicz et al., 2021; Zampakis et al., 2021). Na zvýšenie senzitivity sa tiež odporúča realizovať CTA v dvoch fázach (Arsava et al., 2022). Rovnako sa odporúča dodržať časový odstup realizácie vyšetrenia od klinického podozrenia na smrť mozgu viac ako 6 hodín (Kerhuel et al., 2016; Basil et al., 2019). Senzitivita vyšetrenia bez ohľadu na použitý skórovací systém klesá pri vážnejšej kraniotraume s porušením celistvosti lebky a po dekompresívnej operácii (do 75 %) (Zampakis et al., 2021). Vyšetrenie sa nehodnotilo na detských pacientoch, je-

dine poľské odporúčania stanovujú vek jeho použitia od 12. roku života (Bohatyrewicz et al., 2021). Technologický rozvoj CT prístrojov umožnil realizáciu tzv. časovo invariantnej CTA (*time-invariant* – TI-CTA), ktorá poskytuje angiografiu prekrytím všetkých časových rámcov a zobrazuje maximálne zvýraznenie tepien počas perfúzneho CT vyšetrenia. Znamená to, že maximálne zvýraznenie ciev sa zobrazí nezávisle od času príchodu kontrastnej látky. Preto TI-CTA nie je citlivá na oneskorený príchod kontrastnej látky do mozgových ciev, takže by mala zobrazovať každú priechodnú cievu (Smit et al., 2012). So zvyšujúcou sa dostupnosťou moderných CT prístrojov sa používanie perfúzneho CT a TI-CTA rozširuje a nahrádza štandardnú CTA technikou (Bohatyrewicz et al., 2021; Sawicki et al., 2017, 2018).

Perfúzna počítačová tomografia (CTP)

CT perfúzia je pokročilá technika CT vyšetrenia, ktorá poskytuje ako anatomické, tak aj funkčné informácie o mozgu. CTP sa bežne používa na hodnotenie cerebrálnej ischémie a vaskularizácie mozgových nádorov a má priestorové rozlíšenie umožňujúce kvantifikáciu perfúzie v akejkoľvek vybranej časti mozgu. Rovnako ako CTA, aj CTP je široko dostupný nástroj, a vďaka dostupnosti automatizovaného softvéru môžu byť CTP výstupy takmer nezávislé od hodnotiaceho lekára. Výhodou CTP je, že ho možno vykonať spolu s CTA. Aplikácia kontrastnej látky pri CTP predstavuje určité riziko poškodenia obličiek. Zásluhou menšieho objemu použitej kontrastnej látky je však pravdepodobnosť významnej nefrotoxicity veľmi malá. CTP dosahuje vysokú senzitivitu a špecificitu (98–100 % a 100 %) (Sawicki et al., 2017; Neves Briard et al., 2023), na základe ktorých ju odporúčajú viaceré odborné spoločnosti (Shemie et al., 2023; Bohatyrewicz et al., 2021). Predpokladá sa, že by mohla byť v budúcnosti schválená aj WBDP (Greer et al., 2020).

Magnetická rezonancia (MRI)

MRI je neinvazívna a presná modalita pri identifikácii štruktúrnych abnormalít mozgu. V bežnej praxi má MRI oproti CT niekoľko **nevýhod**: je časovo náročnejšia, nie je tak

široko dostupná a je ťažšie ju vykonať u kriticky chorých pacientov a pacientov na mechanickej ventilácii.

Orison et al. ako prví identifikovali 6 znakov na MRI u pacientov so smrťou mozgu: 1) transtentoriálna a tonzilárna herniácia, 2) chýbajúci „*flow void*“ v mozgových cievach, 3) dediferenciácia sivej a bielej hmoty, 4) absencia postkontrastného intrakraniálneho sytenia, 5) postkontrastné sytenie tepien („*intravascular enhancement sign*“) a 6) výrazné postkontrastné sytenie nosa („*hot nose sign*“) (Orison et al., 1994). Ďalšie parametre zakomponované do diagnostiky sú DWI, ktoré ukazuje difúzne zníženie hodnôt ADC v bielej aj sivej hmote (Kumada et al., 2001), a SWI, kde nachádzame tzv. „*transcerebral*“ a „*transcortical vein sign*“ (Sohn et al., 2021). Treba mať na pamäti, že žiaden z týchto MRI znakov nie je patognomonický pre smrť mozgu, keďže sa môžu vyskytovať aj v iných prípadoch, ako napríklad pri závažnom hypoxicko-ischemickom poškodení mozgu (Correa et al., 2022). V metaanalýze realizovanej autormi Briard et al. malo MR vyšetrenie v dokazovaní smrti mozgu zastúpenie okolo 2–3 % z konfirmačných testov (Briard et al., 2023). „*Time of flight*“ MRA, dynamická kontrastná MRA a MR perfúzne vyšetrenie sa tiež využívajú na dôkaz zlyhania mozgovej cirkulácie, avšak na validáciu týchto testov ako konfirmačných na rutinné používanie na dôkaz smrti mozgu je potrebný ďalší výskum, čo uvádzajú aj aktuálne publikované odporúčania (Greer et al., 2020; Shemie et al., 2023; Greer et al., 2023).

Transkraniálny dopplerovský ultrazvuk (TCD)

Základom stanovenia smrti mozgu pomocou TCD je vyšetrenie prietoku intrakraniálnych tepien cez temporálne kostné okno, obojstranne subokcipitálne a prípadne obojstranne transorbitálne okno (Školoudík, 2017). K jeho **výhodám** patria rýchlosť, minimálna invazivita, finančná nenáročnosť, možnosť opakovania, možnosť vykonania pri lôžku pacienta, čo je dôležité pri použití u nestabilných pacientov. **Nevýhody** predstavuje dostupnosť, vysoká závislosť od operátora, špecifický tréning (Gastala et al., 2019). Slabou stránkou je tiež, že približne u 10 % dospelých je realizácia TCD pre

hrúbku lebky technicky neúspešná (AIUM, 2023). Používanie ultrazvuku ako doplnkového testu pri stanovení smrti mozgu odporúča u dospelých iniciatíva WBDP v USA, Kanade a mnohých európskych krajinách vrátane Českej republiky. Metodiku vyšetrenia so špecifickými parametrami ako preukázanie reverberačného toku, tiež nazývané „*to-and-fro*“ vzorec, krátke systolické hroty alebo úplné vymiznutie prietoku v intrakraniálnych tepnách podrobne opisuje publikovaný pokyn (Tomek et al., 2016). Opisovaná senzitivita v publikáciách varíruje, posledné údaje z Nemecka udávajú hodnotu 82,2 % (Hoffman et Sali et Masuhr, 2024). Senzitivita stúpa s odstupom času od klinickej diagnózy, pričom do 6 hodín dosahuje 58 % a do 36 hodín až 100 % (Kuo et al., 2006). Niektoré krajiny používajú ultrazvuk ako metódu predchádzajúcu CTA, keď sa pomocou TCD zníži čas do realizácie CTA a zároveň zníži počet negatívnych CTA vyšetrení (SFN et SFR et AB, 2011).

Záver

Včasná a správne rozpoznanie smrti mozgu je dôležité na zabránenie zbytočným intervenciám, pomôže potvrdiť a pochopiť stav aj rodinným príslušníkom pacienta, zlepšuje úspešnosť transplantácie orgánov a šetrí zdravotnícke zdroje. Smrť mozgu zostáva klinickou diagnózou. Na potvrdenie smrti mozgu však okrem klinických testov existujú aj konfirmačné vyšetrenia, z ktorých sú v súčasnosti používané najmä zobrazovacie – preukazujúce zlyhanie mozgovej cirkulácie. Realizácia a výber konfirmačného vyšetrenia musí zodpovedať miestnym zákonom. Napriek snahám o konsenzus aktuálne celosvetovo neexistuje jedno univerzálne vyšetrenie a použitie jednotlivých vyšetrení je ovplyvnené aj dostupnosťou a zvyklosťami konkrétneho pracoviska. V našich podmienkach sa odporúčania a z nich vyplývajúca legislatíva prikláňajú k DSA a perfúznej scintigrafii, ktorá môže byť zároveň indikovaná aj u detského pacienta. Neinvazívna CT a MR diagnostika má sľubnú budúcnosť, najmä v oblasti perfúzných vyšetrení, ktoré majú už dnes preukázanú vysokú presnosť. Na validáciu ich úplného využitia sú však potrebné ďalšie klinické a aj právne kroky.

LITERATÚRA

1. Angiografie mozgových tepen pro stanovení smrti mozku – metodický pokyn. Available from: http://www.csir.cz/files/documents/ag_mozgovych_tepen_pro_stanoveni_smrti_mozku.pdf.
2. Arsava EM, Ayvacioglu Cagan C, Gumeler E, Parlak S, et al. Comparison of early- and late-phase CT angiography findings in brain death. *J Neurol*. 2022;269(11):5973-5980. doi: 10.1007/s00415-022-11281-x.
3. Bohatyrewicz R, Pastuszka J, Walas W, et al. Implementation of Computed Tomography Angiography (CTA) and Computed Tomography Perfusion (CTP) in Polish Guidelines for Determination of Cerebral Circulatory Arrest (CCA) during Brain Death/Death by Neurological Criteria (BD/DNC) Diagnosis Procedure. *J Clin Med*. 2021;10(18):4237. doi: 10.3390/jcm10184237.
4. Brasil S, Bor-Seng-Shu E, de-Lima-Oliveira M, et al. Computed tomography angiography accuracy in brain death diagnosis. *J Neurosurg*. 2019 Sep 27;133(4):1220-1228. doi: 10.3171/2019.6.JNS191107. PMID: 31561215.
5. Neves Briard J, Nitulescu R, Lemoine É. Diagnostic accuracy of ancillary tests for death by neurologic criteria: a systematic review and meta-analysis. *Can J Anaesth*. 2023;70(4):736-748. doi: 10.1007/s12630-023-02426-1.
6. Cohen JD, Katvan E, Ashkenazi T. Brain Death Determination in Israel: The First 9 Years of Experience Following Changes Made by the Brain and Respiratory Death Determination Law. *Isr Med Assoc J*. 2022;24(8):524-528.
7. Corrêa DG, de Souza SR, Nunes PGC, et al. The role of neuroimaging in the determination of brain death. *Radiol Bras*. 2022;55(6):365-372. doi: 10.1590/0100-3984.2022.0016.
8. Flowers WM Jr, Patel BR. Persistence of cerebral blood flow after brain death. *South Med J*. 2000;93(4):364-70. doi:10.1097/00007611-200004000-00003
9. Gastala J, Fattal D, Kirby PA, et al. Brain death: Radiologic signs of a non-radiologic diagnosis. *Clin Neurol Neurosurg*. 2019;185:105465. doi:10.1016/j.clineuro.2019.105465.
10. Greer DM, Kirschen MP, Lewis A, et al. Pediatric and Adult Brain Death/Death by Neurologic Criteria Consensus Guideline. *Neurology*. 2023;101(24):1112-1132. doi:10.1212/WNL.0000000000207740.
11. Greer DM, Lewis A, Kirschen MP. New developments in guidelines for brain death/death by neurological criteria. *Nat Rev Neurol*. 2024;20(3):151-161. doi: 10.1038/s41582-024-00929-z.
12. Greer DM, Lewis A, Kirschen MP. New developments in guidelines for brain death/death by neurological criteria. *Nat Rev Neurol*. 2024 Mar;20(3):151-161. doi: 10.1038/s41582-024-00929-z. Epub 2024 Feb 2. PMID: 38307923.
13. Greer DM, Shemie SD, Lewis A, et al. Determination of brain death/death by neurologic criteria: the world brain death project. *JAMA*. 2020;324(11):1078-1097. doi: 10.1001/jama.2020.11586. PMID: 32761206.
14. Heran MK, Heran NS, Shemie SD. A review of ancillary tests in evaluating brain death. *Can J Neurol Sci*. 2008;35(4):409-419. doi: 10.1017/s0317167100009069. PMID: 18973057.
15. Heřman M. CT angiografie tepen zásobujících mozek pro stanovení smrti mozgu u dárců orgánů. *Ces Radiol*. 2020;74(4):235-237.
16. Hoffmann O, Salih F, Masuhr F. Computed tomography angiography in the diagnosis of brain death: Implementation and results in Germany. *Eur J Neurol*. 2024;31(4):e16209. doi: 10.1111/ene.16209.
17. Kapucu OL, Nobili F, Varrone A, et al. EANM procedural guideline for brain perfusion SPECT using 99mTc-labeled radiopharmaceuticals, version 2. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2009;36(12):2093-102. doi: 10.1007/s00259-009-1266-y.
18. Kerhuel L, Srairi M, Georget G. The optimal time between clinical brain death diagnosis and confirmation using CT angiography: a retrospective study. *Minerva Anestesiol*. 2016;82(11):1180-1188.
19. Kumada K, Fukuda A, Yamane K, et al. Diffusion-weighted imaging of brain death: study of apparent diffusion coefficient. *No To Shinkei*. 2001;53(11):1027-31.
20. Kuo JR, Chen CF, Chio CC et al. Time dependent validity in the diagnosis of brain death using transcranial Doppler sonography. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*. 2006;77:646-649.
21. Lewis A, Bakkar A, Kreiger-Benson E, et al. Determination of death by neurologic criteria around the world. *Neurology*. 2020;95(3):e299-e309. doi:10.1212/WNL.0000000000009888.
22. Lewis A, Liebman J, Kreiger-Benson E, et al. Ancillary Testing for Determination of Death by Neurologic Criteria Around the World. *Neurocrit Care*. 2021;34(2):473-484. doi:10.1007/s12028-020-01039-6.
23. MacDonald D, Stewart-Perrin B, Shankar JJS. The Role of Neuroimaging in the Determination of Brain Death. *J Neuroimaging*. 2018;28(4):374-379. doi: 10.1111/jon.12516.
24. Martinková J, Chrastina M, Cingelová M, et al. Mozgová smrť – medicínske aspekty, legislatívne normy v Slovenskej republike. *Neurol. praxi*. 2015;16(3):140-143.
25. Nakagawa TA, Ashwal S, Mathur M, et al. Guidelines for the determination of brain death in infants and children: an update of the 1987 task force recommendations-executive summary. *Ann Neurol*. 2012;71(4):573-85. doi: 10.1002/ana.23552.
26. Neves Briard J, Nitulescu R, Lemoine É, et al. Diagnostic accuracy of ancillary tests for death by neurologic criteria: a systematic review and meta-analysis. *Can J Anaesth*. 2023;70(4):736-748. doi: 10.1007/s12630-023-02426-1. Epub 2023 May 8. PMID: 37155120; PMCID: PMC10202988.
27. Orrison WW Jr, Champlin AM, Kesterson OL, et al. MR 'hot nose sign' and 'intravascular enhancement sign' in brain death. *AJNR Am J Neuroradiol*. 1994;15(5):913-6.
28. Paolin A, Manuali A, Di Paola F, et al. Reliability in diagnosis of brain death. *Care Med*. 1995;21(8):657-62. doi: 10.1007/BF01711544.
29. Sawicki M, Solec-Pastuszka J, Chamier-Ciemirska K, et al. Computed Tomography Perfusion is a Useful Adjunct to Computed Tomography Angiography in the Diagnosis of Brain Death. *Clin Neuroradiol*. 2019;29(1):101-108. doi: 10.1007/s00062-017-0631-7.
30. Sawicki M, Solec-Pastuszka J, Chamier-Ciemirska K. Accuracy of Computed Tomographic Perfusion in Diagnosis of Brain Death: A Prospective Cohort Study. *Med Sci Monit*. 2018 May 4;24:2777-2785. doi: 10.12659/MSM.906304. PMID: 29727439; PMCID: PMC5957092.
31. Sekar KC. Brain death in the newborn. *J Perinatol*. 2007;27(1):59-62. doi:10.1038/sj.jp.7211718.
32. Shemie SD, Wilson LC, Hornby L, et al. A brain-based definition of death and criteria for its determination after arrest of circulation or neurologic function in Canada: a 2023 clinical practice guideline. *Can J Anaesth*. 2023;70(4):483-557. doi: 10.1007/s12630-023-02431-4.
33. Silvester W, Bevan R, Brieva J, et al. The ANZICS statement on death and organ donation. 4.1 ed. Camberwell: Australian and New Zealand Intensive Care Society (ANZICS). 2021; 68 s.
34. Smit EJ, Vonken EJ, van der Schaaf IC, et al. Timing-invariant reconstruction for deriving high-quality CT angiographic data from cerebral CT perfusion data. *Radiology*. 2012;263(1):216-25. doi: 10.1148/radiol.11111068.
35. Société Française de Neuroradiologie; Société Française de Radiologie; Agence de la Biomédecine. Recommandations sur les critères diagnostiques de la mort encéphalique par la technique d'angioscanner cérébral [Recommandations on diagnostic criteria of brain death by the technique of CT angiography]. *J Neuroradiol*. 2011;38(1):36-9. doi: 10.1016/j.neurad.2011.01.001.
36. Sohn CH, Lee HP, Park JB, et al. Imaging findings of brain death on 3-tesla MRI. *Korean J Radiol*. 2012;13(5):541-9. doi: 10.3348/kjr.2012.13.5.541.
37. Školoudík D. Diagnostika smrti mozku pomocí transkraniální dopplerometrie a transkraniální duplexní sonografie. *Neurol. praxi*. 2017;18(4):244-247.
38. The American Institute of Ultrasound in Medicine (AIUM) Practice Parameter for the Performance of Transcranial Doppler Ultrasound. *J Ultrasound Med*. 2023;42(9):E36-E44. doi:10.1002/jum.16234.
39. Thomas EO, Manara A, Dineen RA, et al. The use of cerebral computed tomographic angiography as an ancillary investigation to support a clinical diagnosis of death using neurological criteria: a consensus guideline. *Anaesthesia*. 2023;78(3):330-336. doi:10.1111/anae.15950.
40. Toffol JG, Lansky LL, Hughes JR, et al. Pitfalls in diagnosing brain death in infancy. *J Child Neurol*. 1987;2(2):134-138. doi: 10.1177/088307388700200209.
41. Tomek A, Školoudík D, Škoda O, et al. Metodika stanovení smrti mozku pomocí transkraniální sonografie vypracovaná Neurosonologickou komisí a Cerebrovaskulární sekci České neurologické společnosti ČLS JEP. *Cesk Slov Neurol N*. 2016;79/112(5):608-611.
42. Young GB, Shemie SD, Doig CJ, et al. Brief review: The role of ancillary tests in the neurological determination of death. *Canadian Journal of Anesthesia*. 2006;53(6):620-627. doi: 10.1007/BF03021855.
43. Zákon č. 44/2013 Sb. Zákon, kterým se mění zákon č. 285/2002 Sb., o darování, odběrech a transplantacích tkání a orgánů a o změně některých zákonů (transplantační zákon), ve znění pozdějších předpisů, a další související zákony.
44. Zákon č. 576/2004 Z. z. o zdravotnej starostlivosti, službách súvisiacich s poskytovaním zdravotnej starostlivosti a o zmene a doplnení niektorých zákonov. §43.
45. Zampakis P, Panagiotopoulos V, Kalogeropoulou C, et al. Computed tomography angiography scoring systems and the role of skull defects in the confirmation of brain death. *Sci Rep*. 2021;11(1):15081. doi: 10.1038/s41598-021-94763-8.
46. Zuckier LS, Kolano J. Radionuclide studies in the determination of brain death: criteria, concepts, and controversies. *Semin Nucl Med*. 2008;38(4):262-73. doi: 10.1053/j.seminuclmed.2008.03.003.