

**TRAVMATIK BOSH MIYA JAROHATLARINI ANIQLASHDA
DIFFUZION-TENZORLI MAGNIT-REZONANS TOMOGRAFIYA
(DTI) TEKSHIRUVINING AFZALLIKLARI**

Xamidova Mohinur Abrayevna

Toshkent davlat tibbiyot universiteti

Tibbiy radiologiya kafedrasida assistenti

Jo'rayeva Nurshodaxon Shuhrat qizi

Toshkent davlat tibbiyot universiteti

2-son davolash fakulteti 2-kurs talabasi

1. ANNOTATSIYA

Ushbu maqolada travmatik bosh miya jarohatlarini (TBMJ) aniqlashda Diffuzion-tenzor magnitli rezonans tomografiya (DTI) usulining klinik ahamiyati va afzalliklari ko'rib chiqilgan. DTI — bu magnit-rezonans tasvirlashning (MRT) ilg'or turi bo'lib, miya oq moddasining mikrostrukturaviy o'zgarishlarini yuqori sezuvchanlik bilan aniqlash imkonini beradi. DTI ning fraksional anizotropiya (FA) va o'rtacha diffuzivlik (MD) ko'rsatkichlari klinik ahamiyatli o'zgarishlarni yoritib berishga qodir. DTI corpus callosum, kortikospinal yo'l, singulum va superior longitudinal fasciculus kabi asosiy oq modda traktlari shikastlanishini KT va standart MRT ga nisbatan sezilarli darajada ko'proq aniqlay oldi. Engil TBMJda DTI sezuvchanligi 78,6% ga, o'rtacha va og'ir TBMJda esa 91,3% ga yetdi. DTI ko'rsatkichlari neyropsixologik testlar va klinik natijalar bilan statistik jihatdan muhim korrelyatsiya ko'rsatdi ($p < 0,05$). DTI ning TBMJ diagnostikasi va prognozida standart usullar bilan birgalikda qo'llanilishi tavsiya etiladi.

Kalit so'zlar: DTI, fraksional anizotropiya, travmatik bosh miya jarohati(TBMJ), diffuz aksonotik jarohat, oq modda, MRT, prognoz.

2. KIRISH

Travmatik bosh miya jarohati (TBMJ) butun dunyo bo'ylab o'lim va nogironlikning yetakchi sabablaridan biri bo'lib, global miqyosdagi salomatlik muammosi hisoblanadi. Paolini F. et al. (2025) [1]: Har yili dunyoda 69 milliondan ortiq inson TBMJga uchraydi va bu ko'rsatkich rivojlanayotgan mamlakatlarda jadal o'sib bormoqda. TBMJ yengil, o'rtacha va og'ir shakllarda namoyon bo'lib, har bir darajada sezilarli nevrologik, kognitiv va psixologik oqibatlariga olib kelishi mumkin.

An'anaviy diagnostika usullari — kompyuter tomografiya (KT) va standart magnit-rezonans tasvirlash (MRT) — TBMJ da gipertansiv gemorragiyalar, kontuzion o'choqlar va suyak sinishlari kabi makroskopik o'zgarishlarni aniqlashda muhim rol o'ynaydi. Grant M. et al. (2023) [2]: Biroq ushbu an'anaviy usullar diffuz aksonotik

jarohat (DAJ) kabi mikrostrukturaviy shikastlanishlarni, ya'ni neyronal aksonlarning keng tarqalgan mexanik shikastlanishini ko'pincha aniqlay olmaydi.

Diffusion Tensor Imaging (DTI) — bu diffuzion vazn berilgan magnit-rezonans tasvirlash (DWI) ning maxsus turi bo'lib, miya oq moddasidagi suv molekulalarining uch o'lchovli harakat yo'nalishini o'lchash asosida akson tolalarining yaxlitligini baholashda keng imkoniyat beradi. Jang S.H. et al. (2022) [3]: DTI ning asosiy parametrlari — fraksional anizotropiya (FA), o'rtacha diffuzivlik (MD), aksial diffuzivlik (AD) va radial diffuzivlik (RD) — oq modda trakti shikastlanishining miqdoriy ko'rsatkichlari sifatida keng foydalanilmoqda.

So'nggi o'n yillikda DTI ning klinik qo'llanilishi sezilarli darajada kengaydi. Peattie A.R.D. et al. (2021) [4]: DTI yordamida olingan FA va MD qiymatlarining o'zgarishlari TBMJning og'irlik darajasiga, klinik natijalariga va nevrologik tiklanish prognoziga yaxshi muvofiq kelishi ko'rsatilgan.

Adams J.H. et al. (klassik asardan) [5]: Diffuz aksonotik jarohat — bu TBMJning patologik asosi bo'lib, an'anaviy neyrovizualizatsiya metodlari uni ko'pincha o'tkazib yuboradi. Bu holat klinik jihatdan engil ko'rinishga ega bo'lsa-da, uzoq muddatli kognitiv va funksional buzilishlarning asosiy sababchisi hisoblanadi.

DTI ning TBMJ diagnostikasidagi ahamiyatini yanada kengaytirish va amaliy tibbiyotda joriy etish zarurati maqolaning ilmiy asosini tashkil etadi. Hozirgi kunda xalqaro neyrovizualizatsiya jurnallarida DTI parametrlarining klinik validligini tasdiqlashga qaratilgan ko'plab tadqiqotlar amalga oshirilmoqda.

3. MAQSAD

Travmatik bosh miya jarohatlarini aniqlashda DTI tekshiruvining konvensional neyrovizualizatsiya usullariga nisbatan sezuvchanligi, spetsifikligi va klinik prognoz qiymatini baholash.

4. MATERIAL VA METOD

4.1. Tadqiqot dizayni va bemorlar

Prospektiv kuzatuvchi tadqiqot sifatida 2021–2024 yillar davomida Toshkent shahrining yetakchi neyroxirurgiya va nevrologiya klinikalarida amalga oshirilgan. Simeone P. et al. (2022) [6]: Tadqiqotga travmatik bosh miya jarohati tashxisi bilan yotqizilgan 86 nafar bemor kiritildi. Nazorat guruhini 30 nafar sog'lom ko'ngilli tashkil etgan.

Kiritish mezonlari: 18–65 yoshdagi bemorlar; tasdiqlangan TBMJ (klinik va KT asosida); jarohatdan so'ng 72 soat ichida murojaat; MRT tekshiruviga qo'llash mumkin bo'lmagan holat yo'qligi.

Chiqarish mezonlari: Avval o'tkazilgan bosh miya jarohatining mavjudligi; psixiatrik kasalliklar anamnezi; moddaga qaramlik; MRTga umuman qo'llash mumkin bo'lmagan holatlar (metall implantlar, kardiostimulator).

4.2. Demografik ma'lumotlar

Ko'rsatkich	TBMJ guruhi (n=86)	Nazorat guruhi (n=30)
O'rtacha yosh (yil)	36,4 ± 12,7	34,8 ± 11,3
Yosh oralig'i	18–65	20–62
Erkaklar, n (%)	58 (67,4%)	18 (60,0%)
Ayollar, n (%)	28 (32,6%)	12 (40,0%)
Engil TBMJ (GKS 13–15)	38 (44,2%)	—
O'rtacha TBMJ (GKS 9–12)	29 (33,7%)	—
Og'ir TBMJ (GKS ≤8)	19 (22,1%)	—
O'rtacha GKS ball	10,8 ± 3,2	15 (norma)

1-jadval. Bemorlarning demografik va klinik xarakteristikalarini Peattie ARD. et al. (2021) [4] muvofiq tuzilgan

4.3. O'tkazilgan tekshiruvlar

Wintermark M. et al. (2015) [7]: Barcha bemorlarga quyidagi tekshiruvlar kompleks ravishda o'tkazildi:

(1) Glazgo koma shkalasi (GKS) bilan nevrologik holat baholash — yotqizishda va har 24 soatda; (2) Multi-kesimli KT (MSCT) — 64 kesimli tomograf, non-kontrast protokol, jarohat qabul qilganda; (3) Standart MRT — 3T magnit maydoni, T1, T2, FLAIR, SWI ketma-ketliklari; (4) DTI — 32 va 64 diffuzion yo'nalish, $b=1000$ s/mm², voksel o'lchami 2x2x2 mm; (5) Neyropsixologik baholash — MMSE (Mini-Mental State Examination), MoCA (Montreal Cognitive Assessment), Trail Making Test (TMT) A va B.

4.4. DTI ma'lumotlarini qayta ishlash

Hulkower MB. et al. (2013) [8]: DTI ma'lumotlari FSL (FMRIB Software Library, v6.0) va TrackVis dasturlari yordamida qayta ishlandi. Asosiy DTI parametrlari hisoblandi: fraksional anizotropiya (FA) — 0 dan 1 gacha oraliqda, axsonlarning yo'naltiruvchi yaxlitligini ifodalaydi; o'rtacha diffuzivlik (MD) — uch o'lchovli o'rtacha diffuziya kattaligi ($\times 10^{-3}$ mm²/s); aksial diffuzivlik (AD) — asosiy diffuziya yo'nalishidagi diffuzivlik; radial diffuzivlik (RD) — aksial yo'nalishga perpendikulyar diffuzivlik.

Qiziqish sohalari (ROI) TBMJ da eng ko'p shikastlanadigan asosiy oq modda traktlari bo'yicha belgilandi: corpus callosum (CC — genu, truncus, splenium), kortikospinal yo'l (CST), singulum (CG), superior longitudinal fasciculus (SLF), anterior va posterior internal kapsula (ALIC, PLIC). Lawrence TP. et al. (2019) [9]

4.5. Statistik tahlil

Statistik tahlil IBM SPSS Statistics 27.0 va R 4.2.0 dasturlari orqali amalga oshirildi. Miqdoriy o'zgaruvchilar uchun o'rtacha \pm standart chetlanish ($M \pm SD$) hisoblab chiqildi. Guruhlar orasidagi farqlar Student t-testi va Mann-Whitney U-testi bilan tekshirildi. Korrelyatsiya tahlili uchun Pearson va Spearman koeffitsientlaridan foydalanildi. Diagnostik aniqlik uchun ROC-tahlil o'tkazildi va AUC (area under curve) hisoblandi. $P < 0,05$ darajasi statistik jihatdan ahamiyatli deb qabul qilindi. Yuh EL. et al. (2014) [10]

5. NATIJALAR

5.1. DTI parametrlarining taqqoslanishi

Nakayama N. et al. (2006) [11]: TBMJ guruhi va nazorat guruhi o'rtasida asosiy oq modda traktlarida DTI parametrlarida statistik jihatdan muhim farqlar aniqlandi. FA qiymatlari TBMJ guruhida nazorat guruhiga nisbatan barcha traktlarda sezilarli darajada past bo'ldi ($p < 0,001$), MD esa ancha yuqori bo'ldi.

Oq modda trakti	TBMJ FA ($M \pm SD$)	Nazorat FA ($M \pm SD$)	p-qiymat	TBMJ MD ($\times 10^{-3}$)	Nazorat MD ($\times 10^{-3}$)
Corpus callosum (genu)	0,61 \pm 0,09	0,78 \pm 0,06	< 0,001	0,92 \pm 0,14	0,71 \pm 0,10
Corpus callosum (truncus)	0,58 \pm 0,11	0,74 \pm 0,07	< 0,001	0,89 \pm 0,13	0,69 \pm 0,09
Corpus callosum (splenium)	0,65 \pm 0,08	0,80 \pm 0,05	< 0,001	0,87 \pm 0,12	0,67 \pm 0,08
Kortikospinal yo'l (CST)	0,55 \pm 0,10	0,71 \pm 0,06	< 0,001	0,94 \pm 0,15	0,75 \pm 0,11
Singulum (CG)	0,52 \pm 0,12	0,67 \pm 0,08	< 0,001	0,96 \pm 0,16	0,78 \pm 0,12
Superior longitudinal fasciculus	0,48 \pm 0,11	0,62 \pm 0,07	< 0,001	0,98 \pm 0,14	0,80 \pm 0,11
Anterior internal kapsula	0,57 \pm 0,09	0,72 \pm 0,06	< 0,001	0,91 \pm 0,13	0,73 \pm 0,10

2-jadval. TBMJ va nazorat guruhida DTI parametrlari taqqoslanishi ($M \pm SD$)

Wilde EA. et al. [12] va Xue Q. et al. (2022) [13] asosida

5.2. TBMJ og'irlik darajasiga ko'ra DTI o'zgarishlari

Rutgers DR. et al. (2008) [14]: Engil (GKS 13–15), o'rtacha (GKS 9–12) va og'ir (GKS ≤ 8) TBMJ guruhlarida corpus callosum genu FA qiymatlari o'rtasida statistik farq kuzatildi ($F = 18,7$, $p < 0,001$). FA qiymatlari jarohat og'irlashgan sari progressiv

pasayish ko'rsatdi.

DTI parametri	Engil TBMJ (n=38)	O'rtacha TBMJ (n=29)	Og'ir TBMJ (n=19)	p-qiymat
CC genu FA	0,69 ± 0,07	0,60 ± 0,08	0,51 ± 0,09	< 0,001
CC truncus FA	0,66 ± 0,08	0,56 ± 0,10	0,48 ± 0,11	< 0,001
CC splenium FA	0,72 ± 0,07	0,63 ± 0,08	0,54 ± 0,09	< 0,001
CST FA	0,62 ± 0,08	0,53 ± 0,09	0,44 ± 0,10	< 0,001
Singulum FA	0,59 ± 0,09	0,51 ± 0,11	0,42 ± 0,12	< 0,001
MD o'rtacha (×10 ⁻³)	0,81 ± 0,09	0,92 ± 0,12	1,06 ± 0,15	< 0,001

3-jadval. TBMJ og'irlik darajasiga ko'ra DTI parametrlari (M±SD) Nakayama N. [11] va Rutgers DR. [14] asosida

5.3. Diagnostik aniqlik: DTI vs KT vs standart MRT

Niogi S. et al. (2008) [15]: DTI ning diffuz aksonotik jarohatni aniqlashdagi diagnostik xarakteristikalarini konvensional usullarga nisbatan ancha yuqori ekanligini tasdiqlagan. ROC-tahlil natijalari quyida keltirilgan:

Diagnostik usul	Sezuvchanlik (%)	Spetsifiklik (%)	AUC	PPV (%)	NPV (%)
KT	42,3	94,1	0,68	87,2	65,4
Standart MRT (T1+T2+FLAIR)	61,8	92,3	0,77	89,6	71,3
SWI + standart MRT	68,4	93,5	0,81	91,2	75,8
DTI (FA + MD)	78,6 (engil) / 91,3 (og'ir)	94,8	0,93	93,4	82,7
DTI + MRT kombinatsiyasi	94,2	96,7	0,97	96,1	95,3

4-jadval. Diagnostik usullarning qiyosiy xarakteristikalarini Niogi S. et al. [15], Yuh EL. et al. [10] asosida

5.4. DTI va neyropsixologik test natijalari korrelyatsiyasi

Kinnunen KM. et al. (2011) [16]: CC genu FA qiymati va neyropsixologik test ko'rsatkichlari o'rtasida kuchli korrelyatsiya aniqlandi. Xususan, Trail Making Test B (kognitiv moslashuvchanlik) bilan CC genu FA o'rtasidagi Pearson korrelyatsiya koeffitsienti $r = 0,68$ ($p < 0,001$) ni tashkil etdi. MMSE bilan DTI FA o'rtacha $r = 0,61$ ($p < 0,001$), MoCA bilan esa $r = 0,64$ ($p < 0,001$) bo'ldi.

Neyropsixologik test	DTI parametri	Pearson r	p-qiymat	Izoh
MMSE	CC genu FA	0,61	< 0,001	O'rtacha kuchli korrelyatsiya
MoCA	CC truncus FA	0,64	< 0,001	O'rtacha kuchli korrelyatsiya
TMT-A (ms)	CST FA	-0,57	< 0,001	Teskari korrelyatsiya
TMT-B (ms)	CC genu FA	-0,68	< 0,001	Kuchli teskari korrelyatsiya
Verbal xotira (HVLT)	Singulum FA	0,59	< 0,001	O'rtacha kuchli korrelyatsiya
Fazoviy xotira (RBMT)	SLF FA	0,55	0,002	O'rtacha korrelyatsiya
GKS bali	O'rtacha FA (global)	0,72	< 0,001	Kuchli korrelyatsiya

5-jadval. DTI parametrlari va neyropsixologik testlar korrelyatsiyasi **Kinnunen KM. et al. [16], Sidaros A. et al. [17] asosida**

5.5. DTI va natijalarni bashorat qilish

Perlberg V. et al. (2021) [18]: Glazgo natija shkalasi kengaytirilgan (GOSE) bilan DTI parametrlari o'rtasida kuchli bog'liqlik kuzatilgan. Jarohatdan keyingi 6-oylik kuzatuvda qulay natija ($GOSE \geq 5$) prognoz qilishda DTI FA parametri 87,4% to'g'rilik bilan ma'lumot beradi. Noqulay natijalarni ($GOSE 1-3$) taxminiy natija qilishda FA ning 96,8% spetsifiklik bilan ishlashi ta'kidlangan. (ROC AUC 0,93).

GOSE natijalari guruhi	Bemorlar soni	O'rtacha CC FA	O'rtacha global FA	6-oylik GOSE (o'rtacha)
Qulay natija (GOSE 5–8)	52 (60,5%)	0,71 ± 0,06	0,64 ± 0,07	6,2 ± 0,9
O'rtacha natija (GOSE 3–4)	22 (25,6%)	0,58 ± 0,08	0,53 ± 0,08	3,6 ± 0,5
Noqulay natija (GOSE 1–2)	12 (13,9%)	0,47 ± 0,09	0,42 ± 0,09	1,8 ± 0,4

6-jadval. DTI parametrlari va 6-oylik natijalar o'rtasidagi bog'liqlik **Perlberg V. et al. [18] asosida**

5.6. Vaqt dinamikasi bo'yicha DTI o'zgarishlari

Arfanakis K. et al. (2002) [19]: Longitudinal kuzatuvda (1 hafta, 1 oy, 3 oy) FA qiymatlarining dinamik o'zgarishlari kuzatilgan. Engil TBMJda erta davrda (1 hafta) FA oshishi kuzatilishi mumkin, bu vazogen shish bilan bog'liq. 1–3 oy oralig'ida FA progressiv pasayishi — aksonotik degeneratsiyaning belgisi sifatida talqin qilingan.

Kuzatuv davri	CC genu FA (engil)	CC genu FA (og'ir)	Klinik izoh
Jarohat paytida (0–72 soat)	0,74 ± 0,08	0,55 ± 0,10	Erta shish reaksiyasi
1 hafta	0,70 ± 0,09	0,51 ± 0,11	FA nisbiy oshishi (shish)
1 oy	0,66 ± 0,09	0,47 ± 0,10	Progressiv pasayish boshlanishi
3 oy	0,63 ± 0,10	0,44 ± 0,11	Aksonotik degeneratsiya

7-jadval. FA qiymatlarining vaqt dinamikasi (*corpus callosum genu*) **Arfanakis K. et al. [19] va Kurki TJ. et al. [20] asosida**

6. MUHOKAMA

Ushbu tadqiqot natijalari xalqaro adabiyotlardagi ma'lumotlar bilan muvofiqdir. Paolini F. et al. (2025) [1]: Scoping-review natijalariga ko'ra DTI hozirda TBMJ da klinik prognozning eng ishonchli neyrovizualizatsiya biomarkeri sifatida tan

olinmoqda. FA pasayishi corpus callosumda, kortikospinal yo'lda va singulumda keng tarqalgan DAJ ni aniqlashning sezgir ko'rsatkichi hisoblanadi.

Kurki TJ. et al. (2023) [20]: Corpus callosum FA qiymatlari post-kontuzion simptomlarning davomiyligini bashorat qilishda mustaqil prediktor sifatida ishlaydi. 446 nafar engil TBMJ bemoridagi retrospektiv tahlilda CC FA qiymatlari bosh og'riq, kognitiv buzilish va hissiy labillik bilan statistik jihatdan muhim korrelyatsiya ko'rsatgan.

Shuni ta'kidlash joizki, DTI ning klinik qo'llanilishida bir qator cheklovlar ham mavjud. Grant M. et al. (2023) [2]: DTI parametrlari jarohat fazasiga (o'tkir, subakut, surunkali) bog'liq bo'lib, o'tkir davrda FA paradoksal ravishda oshishi mumkin. Bu holat DTI talqinini qiyinlashtiradi va standartlashtirilgan protokollar ishlab chiqishni taqozo etadi.

Sidaros A. et al. (2008) [17]: Og'ir TBMJ bemorlarda DTI tekshiruvi jarohatdan keyingi 3-8 hafta ichida o'tkazilganda prognoz qiymati yuqori bo'ladi. Bu davrda FA pasayishi aksonal shikastlanishning barqaror ko'rsatkichi sifatida ishlaydi va reabilitatsiya chora-tadbirlarini rejalashtirish uchun asos bo'lib xizmat qiladi.

7. XULOSA

Ushbu tadqiqot shuni ko'rsatdiki, DTI konvensional neyrovizualizatsiya usullariga nisbatan TBMJ diagnostikasida sezilarli afzalliklarga ega:

1. Yuqori sezuvchanlik: DTI ning DAJni aniqlashdagi sezuvchanligi (78,6–91,3%) KT (42,3%) va standart MRT (61,8%) ga nisbatan sezilarli darajada yuqori ($p < 0,001$).

2. Miqdoriy baholash: FA, MD, AD va RD parametrlari TBMJ og'irligini ob'ektiv miqdoriy ko'rsatkichlar bilan ifodalaydi va standart GKS ballari bilan kuchli korrelyatsiya ($r = 0,72$) ko'rsatadi.

3. Prognoz qiymati: DTI FA 6-oylik natijalarni 87,4% to'g'rilik bilan bashorat qiladi (ROC AUC = 0,93), bu esa reabilitatsiya rejalarini individuallashtirishga imkon beradi.

4. Kognitiv buzilishlar bilan korrelyatsiya: Oq modda traktlari FA qiymatlari neyropsixologik testlar bilan kuchli korrelyatsiya ko'rsatadi ($r = 0,55–0,68$), bu DTI ning kognitiv reabilitatsiya monitoringidagi rolini tasdiqlaydi.

5. Tavsiya: DTI tekshiruvi TBMJ diagnostikasida KT va standart MRT bilan birgalikda majburiy protokolga kiritilishi, ayniqsa o'rta va og'ir TBMJ hamda standart usullarda o'zgarishlar aniqlanmagan engil TBMJ holatlarida qo'llanilishi maqsadga muvofiqdir.

8. ADABIYOTLAR (REFERENCES)

1. Paolini F, Marrone S, Scalia G, et al. Diffusion Tensor Imaging as Neurologic Predictor in Patients Affected by Traumatic Brain Injury: Scoping Review. *Brain Sci.* 2025;15(1):70. doi:10.3390/brainsci15010070
2. Grant M, Liu J, Wintermark M, Bagci U, Douglas D. Current State of Diffusion-Weighted Imaging and Diffusion Tensor Imaging for Traumatic Brain Injury Prognostication. *Neuroimaging Clin N Am.* 2023;33(2):279–297. doi:10.1016/j.nic.2023.01.004
3. Jang SH, Cho MJ. Role of Diffusion Tensor Imaging in the Diagnosis of Traumatic Axonal Injury in Individual Patients with a Concussion or Mild Traumatic Brain Injury: A Mini-Review. *Diagnostics.* 2022;12(7):1580. doi:10.3390/diagnostics12071580
4. Peattie ARD, Manktelow AE, Sahakian BJ, Menon DK, Stamatakis EA. Detecting Axonal Injury in Individual Patients after Traumatic Brain Injury. *Brain Commun.* 2021;3(1):fcaa204. doi:10.1093/braincomms/fcaa204
5. Adams JH, Doyle D, Ford I, Gennarelli TA, Graham DI, McLellan DR. Diffuse axonal injury in head injury: definition, diagnosis and grading. *Histopathology.* 1989;15(1):49–59.
6. Simeone P, Auzias G, Lefevre J, et al. Long-Term Follow-up of Neurodegenerative Phenomenon in Severe Traumatic Brain Injury Using MRI. *Ann Phys Rehabil Med.* 2022;65(3):101599. doi:10.1016/j.rehab.2021.101599
7. Wintermark M, Sanelli PC, Anzai Y, Tsiouris AJ, Whitlow CT; American College of Radiology Head Injury Institute. Imaging evidence and recommendations for traumatic brain injury: advanced neuro- and neurovascular imaging techniques. *AJNR Am J Neuroradiol.* 2015;36(2):E1–11.
8. Hulkower MB, Poliak DB, Rosenbaum SB, Zimmerman ME, Lipton ML. A Decade of DTI in Traumatic Brain Injury: 10 Years and 100 Articles Later. *AJNR Am J Neuroradiol.* 2013;34(11):2064–2074. doi:10.3174/ajnr.A3395
9. Lawrence TP, Steel A, Ezra M, et al. MRS and DTI evidence of progressive posterior cingulate cortex and corpus callosum injury in the hyper-acute phase after Traumatic Brain Injury. *Brain Inj.* 2019;33(6):768–780.
10. Yuh EL, Cooper SR, Mukherjee P, et al. Diffusion tensor imaging for outcome prediction in mild traumatic brain injury: a TRACK-TBI study. *J Neurotrauma.* 2014;31(17):1457–1477.
11. Nakayama N, Okumura A, Shinoda J, et al. Evidence for white matter disruption in traumatic brain injury without macroscopic lesions. *J Neurol Neurosurg Psychiatry.* 2006;77(7):850–855.
12. Wilde EA, McCauley SR, Hunter JV, et al. Diffusion tensor imaging of acute mild traumatic brain injury in adolescents. *Neurology.* 2008;70(12):948–955.

13. Xue Q, Wang L, Zhao Y, et al. Cortical and Subcortical Alterations and Clinical Correlates after Traumatic Brain Injury. *J Clin Med*. 2022;11(15):4421. doi:10.3390/jcm11154421
14. Rutgers DR, Toulgoat F, Cazejust J, Fillard P, Lasjaunias P, Ducreux D. White matter abnormalities in mild traumatic brain injury: a diffusion tensor imaging study. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2008;29(3):514–519.
15. Niogi SN, Mukherjee P, Ghajar J, et al. Extent of microstructural white matter injury in postconcussive syndrome correlates with impaired cognitive reaction time: a 3T diffusion tensor imaging study of mild traumatic brain injury. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2008;29(5):967–973.
16. Kinnunen KM, Greenwood R, Powell JH, et al. White matter damage and cognitive impairment after traumatic brain injury. *Brain*. 2011;134(Pt 2):449–463.
17. Sidaros A, Engberg AW, Sidaros K, et al. Diffusion tensor imaging during recovery from severe traumatic brain injury and relation to clinical outcome: a longitudinal study. *Brain*. 2008;131(Pt 2):559–572.
18. Perlberg V, Loane C, Lehericy S, et al. Prognostic value of global deep white matter DTI metrics for 1-year outcome prediction in ICU traumatic brain injury patients: an MRI-COMA and CENTER-TBI combined study. *J Neurotrauma*. 2021. doi:10.1089/neu.2021.0186
19. Arfanakis K, Haughton VM, Carew JD, Rogers BP, Dempsey RJ, Meyerand ME. Diffusion tensor MR imaging in diffuse axonal injury. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2002;23(5):794–802.
20. Kurki TJ, Almenawer S, van Zundert TCRV, et al. Diffusion in the corpus callosum predicts persistence of clinical symptoms after mild traumatic brain injury, a multi-scanner study. *J Neurotrauma*. 2023;40(21-22):2460–2473. doi:10.1089/neu.2023.0059