








<https://doi.org/10.1007/s10072-022-06510-0>

ORIGINALARTIKEL



Die Wirksamkeit der Hochtontherapie bei der komplexen Rehabilitation von Soldaten mit posttraumatischer Belastungsstörung und traumatischer Hirnverletzung

Kostyantyn D. Babov¹  - Iryna B. Zabolotna¹  - Alexander L. Plakida¹  - Veronika S. Volyanska²  -
Iryna K. Babova³  - Sergej G. Guschtscha¹  - Iryna A. Kolker² 

Angenommen: 7. Oktober 2021 / Angenommen: 14. November 2022

© Fondazione Società Italiana di Neurologia 2022

Abstrakt

Einleitung Infolge der in den letzten Jahrzehnten immer häufiger auftretenden lokalen militärischen Konflikte ist die Zahl der Militärangehörigen, die Kampfstress ausgesetzt sind, stark gestiegen. Mehr als 50 % von ihnen leiden an einer posttraumatischen Belastungsstörung. Die häufigste Komorbidität in dieser Kategorie von Patienten ist eine traumatische Hirnverletzung. Da der langfristige Einsatz von pharmakologischen Mitteln unerwünscht ist, sollten bei der Rehabilitation physiotherapeutische Verfahren bevorzugt werden. **Ziele und Methoden** Wir untersuchten 50 Patienten mit posttraumatischer Belastungsstörung in Kombination mit einem geschlossenen Schädel-Hirn-Trauma. Gruppe 1-25 Patienten erhielten eine komplexe Standardbehandlung in der Rehabilitationsphase des Sanatoriums (Diättherapie, Klimatherapie, Balneotherapie, Bewegungstherapie, Psychotherapie). Gruppe 2-25 Patienten erhielten zusätzlich zur Standardkomplexbehandlung eine Hochtontherapie.

Ergebnisse Die komplexe Rehabilitation der Patienten mit Hilfe der Hochtontherapie trägt zu einem signifikanten Rückgang der asthenoneurotischen ($p < 0,05$) und asthenisch-depressiven ($p < 0,01$) Syndrome bei und hat eine psycho-relaxierende Wirkung auf das Angstsyndrom ($p < 0,01$). Auch der Schweregrad der pyramidalen Symptome nahm ab und das vestibulo-ataktische Syndrom bildete sich zurück ($p < 0,05$). Die kurmäßige Anwendung der Hochtontherapie ging mit einer signifikanten Wiederherstellung der elastotonischen Eigenschaften der Gefäßwand und einer Verbesserung der zerebralen Durchblutung einher ($p < 0,05$). Es wurde eine positive Dynamik der elektrophysiologischen Indikatoren festgestellt: eine Abnahme der Intensität der langsamen Rhythmen vor dem Hintergrund einer Zunahme der Frequenz und Intensität des Alpha-Rhythmus in beiden Hemisphären ($p < 0,05$), was auf eine Harmonisierung der bioelektrischen Aktivität des Gehirns hinweist.

Schlüsselwörter Hochtontherapie - Traumatische Hirnverletzung - Elektroenzephalographie

Einführung

Die überwiegende Mehrheit der Militärangehörigen, die während ihrer Teilnahme an lokalen Kriegen in den letzten Jahrzehnten Kampfstress ausgesetzt waren, leidet an einer posttraumatischen Belastungsstörung (PTSD). Nach Angaben verschiedener Forscher liegt diese Zahl zwischen

² Nationale Medizinische Universität Odessa, Odessa 65000, Ukraine

³ Staatliche Einrichtung "Südkrainisches Nationales Pädagogisches Institut Nach K.D. Ushynsky benannte Universität", Odessa 65020, Ukraine

Published online: 22 November 2022

58,3 bis 77,8 % der Kombattanten [1-6]. Eine der häufigsten (und schwersten) Komorbiditäten bei dieser Patientenkategorie ist eine traumatische Hirnverletzung [7-11]. Die Einschränkung der lebenswichtigen Aktivitäten dieser Patienten und die damit einhergehende Verringerung der Lebensqualität sind meist mit verschiedenen Arten von Beeinträchtigungen der Körperfunktionen verbunden:

✉ Alexander L. Plakida
aplakida@mail.ru

¹ Staatliche Institution "Ukrainisches Forschungsinstitut für Medizin Rehabilitationstherapie des Gesundheitsministeriums der Ukraine", Odessa 65014, Ukraine

motorisch (Paresen und Lähmungen, Gleichgewichtsstörungen und Koordinationsstörungen), sensorisch (Hör- und Sehstörungen) sowie kognitiv und emotional (Depressionen, Angstzustände, Aggressionen, Persönlichkeitsveränderungen) [12-15].

Es ist bekannt, dass die Folgen eines Schädel-Hirn-Traumas, wie jede Krankheit exogenen organischen Ursprungs, in erster Linie durch Asthenie gekennzeichnet sind. Die klinischen Manifestationen werden durch eine pathopsychologisch bedingte erhöhte Erschöpfung bestimmt, die ein Kardinalzeichen für posttraumatische Veränderungen der geistigen Aktivität ist [16, 17]. Diese Erschöpfung macht sich besonders bei der Untersuchung der Intelligenz in einem pathopsychologischen Experiment bemerkbar [18].

1 3

Eine posttraumatische zerebrale Pathologie tritt selten ohne intellektuelle und amnestische Störungen auf. Die Erschöpfung kann sich in geistigen Störungen äußern: Die Patienten haben oberflächliche Urteile und Schwierigkeiten, die Lebenszeichen von Objekten und Phänomenen zu erkennen [19]. Diese Art der einfachen Beurteilung kann vorübergehend sein. Oft wird schon eine geringe geistige Belastung für den Patienten unerträglich und führt zu schwerer Erschöpfung [20, 21].

In einer späteren Phase werden sowohl die destruktiven als auch die reparativen Prozesse im Gehirn mit der möglichen Entwicklung von Narbenbildung und Atrophie abgeschlossen. Daher ist eines der Hauptkriterien für die Verbesserung des Zustands des morphologischen Substrats die vollständige Wiederherstellung der zerebralen Durchblutung [22-25]. Eines der dringlichsten Probleme in der Langzeitphase eines Schädel-Hirn-Traumas ist der Zustand einer angemessenen zerebralen Perfusion und die Aufrechterhaltung der zerebralen Autoregulation. Verstöße gegen die Autoregulation und die Reaktivität der Hirngefäße in diesem Zeitraum führen zu einer Diskrepanz zwischen dem Volumen des zerebralen Kreislaufs, dem Stoffwechsel und der funktionellen Aktivität des Gehirns. Einen wesentlichen Einfluss auf die Autoregulation des zerebralen Kreislaufs hat der intrakranielle Druck. Daher ist die transkraniale Dopplersonographie (TDS) eine aktuelle Untersuchung für dieses Patientenkontingent, da sie es ermöglicht, den Zustand des zerebralen Blutflusses schnell und qualitativ zu beurteilen, Funktionstests zur Bestimmung der Reaktivität der Blutgefäße durchzuführen und den Widerstand der Gefäßwand zu bewerten [26-28].

Die Krankenhausphase der Behandlung kann die vollständige Genesung von Patienten mit PTBS und Schädel-Hirn-Trauma nicht vollständig lösen. Die Rehabilitation solcher Patienten nimmt einen beträchtlichen Zeitraum in Anspruch [29-32]. Bei der pharmakologischen

Behandlung der Langzeitfolgen werden Antidepressiva bevorzugt, da in 50 % der Fälle depressive Störungen mit dieser Erkrankung einhergehen. Diese Methode hat jedoch leider viele negative Folgen und Nebenwirkungen [33].

Physiotherapeutische Behandlungsmethoden, die die Besonderheiten der Funktionsweise des Gehirns berücksichtigen, sind akzeptabler: transzerebrale elektrische Effekte, Magnettherapie, Lasertherapie und Mikrowellentherapie [34-36]. Eine der vielversprechenden physiotherapeutischen Methoden ist die Hochtontherapie (HTT). Sie verwendet elektrische Ströme mit einer Frequenz von 4096 bis 32768 Hz. Ein Merkmal der HTT ist die Stimulation der intrazellulären Mitochondrien, die mit einer Zunahme ihrer Anzahl und Größe einhergeht. Dadurch wird die ATP-Synthese erhöht, was regenerative Prozesse fördert. Positive Daten über den Einsatz von HTT wurden bei Patienten mit zirkulatorischer Enzephalopathie gewonnen [37-39]. Es wurde nachgewiesen, dass die Hochtontherapie zu einer deutlichen Rückbildung der Beschwerden und neurologischen Manifestationen der Krankheit, zur Wiederherstellung der intellektuellen amnestischen Funktionen und zu einer deutlichen Verbesserung der zerebralen Durchblutung führt. Leider ist die Zahl der veröffentlichten Arbeiten über die Ergebnisse der Anwendung von HTT sehr gering, so dass weitere Forschungen erforderlich sind [40].

Ziel der Studie war es, die Wirksamkeit der Hochtontherapie bei der komplexen Behandlung von Militäranghörigen mit posttraumatischer Belastungsstörung und den Folgen eines leichten Schädel-Hirn-Traumas in der Rehabilitationsphase in einem Sanatorium zu untersuchen.

Gegenstand und Forschungsmethoden

Wir untersuchten 50 Militäranghörige mit PTBS und den Folgen eines leichten Schädel-Hirn-Traumas (mTBI), die unmittelbar nach ihrer Entlassung aus den Krankenhäusern in eine Früh-Rehabilitation in einem Sanatorium aufgenommen wurden. Alle Patienten waren Männer; das Durchschnittsalter betrug $(29,43 \pm 5,86)$ Jahre.

Die Einschlusskriterien waren wie folgt: (1) der Patient muss mindestens 18 Jahre alt sein, (2) die Kriterien für die Diagnose einer posttraumatischen Belastungsstörung und eine zuverlässig diagnostizierte leichte geschlossene Schädel-Hirn-Verletzung gemäß ICD 10 erfüllen; (3) eine bestätigte Tatsache der direkten Teilnahme an Feindseligkeiten; (4) die Begrenzung der Teilnahme an Feindseligkeiten beträgt nicht weniger als 1 Jahr; (5) männliches Geschlecht; und (6) freiwillige informierte Zustimmung zur Teilnahme an der Studie.

Die Ausschlusskriterien waren wie folgt: (1) Suizidgefährdung; (2) eine laufende Episode einer bipolaren Erkrankung oder psychotischen Störung; (3) aktueller Alkohol- oder Drogenmissbrauch; (4) gleichzeitige psychiatrische oder psychologische Behandlung einer posttraumatischen Belastungsstörung außerhalb einer Kurbehandlung; (5) Schädel-Hirn-Verletzungen von mittlerem und schwerem Schweregrad; (6) epileptische Anfälle in der Vorgeschichte oder epileptiforme Aktivität, die anhand von Elektroenzephalographie-Daten registriert wurde; und (7) das Vorhandensein von implantierten Metallstrukturen und eines Herzschrittmachers.

Zu einer umfassenden Untersuchung der Patienten gehören:

- Neurologische Untersuchung: Beschwerden des Patienten, Verletzungsbedingungen, Lebensgeschichte, objektiver neurologischer Status im Hinblick auf das Vorhandensein von fokalen Symptomen, Funktionsstörungen der Hirnnerven, Anzeichen einer Schädigung des Hirnstamms, der Pyramidenbahn, von Sprach-, Gleichgewichts- und autonomen Störungen
- Selbsteinschätzung des psychologischen Zustands nach der WAM-Methode (Wohlbefinden, Aktivität, Stimmung), Bewertung des Ausmaßes des ängstlich-depressiven Zustands anhand der Hamilton Anxiety Rating Scale (HARS) und Hamilton Depression Rating Scale (HDSR) [41, 42].
- Beurteilung des Zustandes des zerebralen Kreislaufs durch Ultraschall-Dopplerographie und transkraniale Duplex-Scans
- Bewertung des Zustands der elektrischen Aktivität des Gehirns mit der Methode der Elektroenzephalographie

Nach der Untersuchung wurden alle Patienten nach dem Zufallsprinzip in zwei Gruppen eingeteilt:

Gruppe 1 (Kontrolle): 25 Patienten mit PTBS und den Folgen einer mTBI erhielten in der Kurphase der Rehabilitation eine komplexe Standardbehandlung:

- Diättherapie (ausgewogene Ernährung mit einem Gesamtkaloriengehalt von 2500-2800 kcal)
- Klimatherapie (Spaziergänge an der frischen Seeluft, mit einem obligatorischen Aufenthalt an der Luft von mindestens 2 Stunden tagsüber)
- Balneotherapie (allgemeine Sauerstoffbäder) (die Behandlungen wurden jeden zweiten Tag durchgeführt, im Umfang von 8-10 Behandlungen pro Kur, Temperatur 38-40° C)
- Physiotherapeutische Übungen (Gruppe, mit aktiven dynamischen und statischen Übungen)

- Psychotherapie (Gruppen- und Einzeltherapie)

Gruppe 2 (Hauptgruppe): 25 Patienten mit PTBS und den Folgen einer mTBI erhielten zusätzlich zur Standardkomplexbehandlung eine Hochtontherapie. Für die Verfahren wurde ein Therapiegerät, HiTOP 184 (gbo Medizintechnik, Rimbach, Deutschland), verwendet. Die Elektroden befanden sich im Bereich des Halskragens. Wir verwendeten einen sinusförmig modulierten Strom mit einer Frequenz von 10 bis 100 Hz. Die Dauer der ersten beiden Prozeduren betrug 40 Minuten, alle weiteren 60 Minuten. Der gesamte Kurs bestand aus 12 Prozeduren.

Die statistische Analyse der erhaltenen Daten wurde mit Microsoft Excel und Statistica v. 5.0 durchgeführt. Mit dem Shapiro-Wilk-Test wurde die empirische Verteilung der Indikatoren auf ihre Übereinstimmung mit dem Normalgesetz überprüft. Die Bewertung der Unterschiede zwischen den Werten in verwandten Stichproben wurde mit dem G-Zeichentest und bei nicht verwandten Stichproben mit dem Student's t-Test durchgeführt. Unterschiede zwischen den untersuchten Daten wurden bei allen Arten der statistischen Analyse als signifikant angesehen, wenn $p < 0,05$.

Ergebnisse und Diskussion

Bei der Erstuntersuchung der Patienten wurde am häufigsten über eine Beeinträchtigung des psychischen Zustands geklagt: Schlafstörungen (96,0 %), emotionale Labilität (94,0 %), Reizbarkeit (92,0 %), Unfähigkeit, sich zu entspannen (88,0 %), Rückzug und Gleichgültigkeit (82,0 %), gedrückte Stimmung (80,0 %) und ängstliche Wahrnehmung von Ereignissen des täglichen Lebens (88,0 %). Hinzu kamen somatische Angstsymptome in Form von grundlosem Körperzittern (84,0 %), subjektivem Empfinden von Herzrhythmusstörungen (78,0 %), Luftnot (76,0 %) und einem "Kloß im Hals" (70,0 %). Die Patienten äußerten keine Gefühle von akuter Melancholie und Verzweiflung.

Alle Patienten hatten gemäß den Indikatoren des WAM-Fragebogens ein niedriges Ausgangsniveau des Selbstwertgefühls. Der Indikator für das Wohlbefinden lag bei $(15,78 \pm 1,46)$ Punkten, der Indikator für die Aktivität bei $(22,35 \pm 1,52)$ Punkten und der Indikator für die Stimmung bei $(16,91 \pm 1,28)$ Punkten, was einem insgesamt niedrigen Wert entsprach.

Der zu Beginn der Behandlung auf der HARS-Skala ermittelte Grad der Ängstlichkeit betrug $(19,18 \pm 2,55)$ Punkte, was dem durchschnittlichen Grad der Ängstlichkeit entspricht.

Die Ergebnisse der Studie auf der HRDS-Skala betragen $(15,28 \pm 1,65)$ Punkte, was es ermöglichte, den Grad der

Depression als mittelschwere depressive Störung zu charakterisieren.

Beim psychischen Zustand der Patienten waren in der überwiegenden Mehrheit der Fälle (84,0 %) eine düstere Reizbarkeit, die Bereitschaft zu affektiven Ausbrüchen bei der Erörterung emotional wichtiger Themen, erhöhte Müdigkeit, Intoleranz gegenüber hellem Licht und lauten Geräuschen, emotionale Labilität, Fixierung auf ihre Gefühle, anhaltende Ängste vor möglichen Nebenwirkungen der Behandlung und eine pessimistische Einschätzung der Gegenwart und der Zukunft zu beobachten. Bei fast allen Patienten wurde bei der gezielten Befragung eine Hypothymie festgestellt, die sich vor allem in einem Verlust des Interesses an Aktivitäten äußerte, die ihnen früher Spaß gemacht hatten.

Bei der neurologischen Untersuchung von Soldaten mit PTBS und den Folgen einer mTBI wurden fast alle primären klinischen neurologischen Syndrome festgestellt, die das Leben der Opfer einschränken: sensorische Störungen, Pyramideninsuffizienz, vestibuläres Syndrom, liquordynamisches Syndrom und Syndrom der autonomen Störungen (Tabelle 1). In den meisten Fällen (76,0 %) wies jeder Patient eine Kombination aus mehreren Syndromen mit unterschiedlichem Ausprägungsgrad auf.

Beim Vergleich der neurologischen Untersuchungsdaten mit den von den Patienten vorgetragenen Beschwerden sind die subjektiven neurologischen Symptome im Allgemeinen den objektiven Symptomen überlegen.

Die sensorischen Beeinträchtigungen äußerten sich in Form von Parästhesiesymptomen wie Kribbeln oder Taubheitsgefühl und Überempfindlichkeit gegenüber sensorischen Reizen.

Reflexstörungen manifestieren den Ausfall der Pyramidenbahnen in Form einer Asymmetrie der Sehnen-Periostal-Reflexe, des Auftretens pathologischer Flexions- oder Extensionszeichen und positiver Achsenreflexe.

Tabelle 1 Häufigkeit der wichtigsten neurologischen Syndrome (Störungen) bei Soldaten mit PTSD und mTBI, $n = 50$

Syndrom	Absoluter Betrag, n	Prozentsatz, %
Sensible Störungen	12	24,0
Pyramideninsuffizienz	14	28,0
Vestibuläres Syndrom	18	36,0
Syndrom der autonomen Störung	37	74,0
Dynamisches Syndrom des Alkoholkonsums	27	54,0

Symptome von Koordinationsstörungen unterschiedlichen Schweregrades (vestibuläres Syndrom) zeigten sich bei den meisten Patienten durch Instabilität in der Romberg-Stellung (ohne Sturzneigung) sowie Schwierigkeiten bei der Durchführung von Koordinationstests.

Das liquordynamische Syndrom äußerte sich in Kopfschmerzen, Schwindel, Schwäche und Tinnitus.

Die häufigsten Symptome waren autonome Störungen. Autonome Funktionsstörungen äußerten sich am häufigsten in Form von Farbveränderungen (80,0 %) und Hauttemperatur (66,0 %), distaler oder generalisierter Hyperhidrosis (58,0 %), Wetterabhängigkeit (44,0 %) und Blutdruckschwankungen (38,0 %).

Bei der Untersuchung des Zustandes des zerebralen Blutflusses mittels transkranieller Dopplersonographie waren die häufigsten Veränderungen Angiospasmen und venöse Abflussbehinderungen aus der Schädelhöhle. Anhand der absoluten Werte der Geschwindigkeitsindikatoren wurde eine leichte Abnahme der linearen Blutflussgeschwindigkeit (LFV) in der mittleren Hirnarterie und dem vertebrobasilären Becken ($p < 0,05$) festgestellt. Eine Abnahme der Blutflussgeschwindigkeit in den Hirngefäßen kann die Erschöpfung der kompensatorisch-adaptiven Reaktionen zur Aufrechterhaltung einer angemessenen Hirnperfusion widerspiegeln. Es sollte auch beachtet werden, dass eine Abnahme der funktionellen Aktivität des Gehirns, die typisch für Patienten mit atrophischen Prozessen des Gehirns ist, die in der Regel auch nach einem Schädel-Hirn-Trauma stärker ausgeprägt sind, ebenfalls zu einer Abnahme der LVF führen kann. Diese Störungen könnten zu einer Abnahme der zerebralen Durchblutung und damit zu einer Beeinträchtigung der funktionellen Aktivität des Gehirns führen, worauf weiter unten eingegangen wird.

Während des EEG zeigten alle Patienten eine Tendenz zur Abnahme der Werte des wichtigsten Hintergrundrhythmus des Gehirns - des Alpha-Rhythmus ($p < 0,05$). Gleichzeitig wurden signifikante Veränderungen in der spontanen bioelektrischen Aktivität des Gehirns festgestellt, die diffus waren und sich in einer Zunahme der Intensität im Delta- und Theta-Rhythmusbereich sowie in einer Abnahme der Intensität im Beta-1-Rhythmusbereich in allen Bereichen des Gehirns in beiden Hemisphären ausdrückten [43].

Bei Patienten mit PTBS, die durch eine mTBI kompliziert sind, kommt es in der frühen Rehabilitationsphase zu einer Kombination aus neurophysiologischen, psychovegetativen, emotionalen und Persönlichkeitsstörungen, die von Veränderungen der zerebralen Hämodynamik und der elektrischen Aktivität des Gehirns begleitet werden.

Als Ergebnis der restaurativen Behandlung wurde in beiden Gruppen eine positive Dynamik der subjektiven und objektiven Krankheitssymptome beobachtet. Signifikante Veränderungen wurden jedoch nur bei den Patienten registriert, die eine HTT erhielten, im Gegensatz zur Kontrollgruppe.

Die HTT führte zur Korrektur mehrerer pyramidaler Symptome: die Asymmetrie des Muskeltonus und der Sehnenreflexe in den oberen und unteren Extremitäten nahm ab ($p < 0,05$). Die Zahl der Patienten mit Manifestationen

des vestibulären ataktischen Syndroms nahm ebenfalls ab: Instabilität in der Romberg-Position ($p < 0,05$) und beeinträchtigte Funktionstests - Fersen-Knie- und Finger-Nase-Tests ($p < 0,05$).

Unter dem Einfluss der Therapie zeigten die Patienten der Gruppen 1 und 2 positive Veränderungen der Indikatoren auf der WAM-Skala (Tabelle 2). Bei den Patienten der Gruppe 1 wurden jedoch nur in Bezug auf das Wohlbefinden und die Stimmung signifikante Verbesserungen festgestellt, während sich in Gruppe 2 alle drei Indikatoren signifikant verbesserten. Das Niveau der WAM-Indikatoren war nach der Behandlung bei den Patienten der Gruppe 2 signifikant höher als bei den Patienten der Gruppe 1, was auf eine signifikante Verbesserung des Selbstwertgefühls in Bezug auf den funktionalen Zustand hinweist. Diese Ergebnisse stimmen mit den Daten anderer Autoren über die positive Wirkung der HTT auf den funktionalen Zustand der Patienten überein [44].

Nach der Behandlung erfuhren die Patienten beider Gruppen mögliche positive Veränderungen bei den

Tabelle 2 Dynamik der WAM-Indikatoren, $M \pm m$

Indikator	1st-Gruppe $n = 25$		2nd-Gruppe $n = 25$		P
	Vor der Behandlung	Nach der Behandlung	Vor der Behandlung	Nach der Behandlung	
Wohlbefinden, Punkte	15.16 ± 1.52	35.23 ± 2.16***	15.78 ± 1.46	46.30 ± 3.21***	< 0.01
Aktivität, Punkte	22.57 ± 1.72	26.88 ± 2.75	22.35 ± 1.52	46.96 ± 3.42***	< 0.001
Laune, Punkte	16.71 ± 1.38	39.17 ± 2.66***	16.97 ± 1.73	53.25 ± 3.36***	< 0.001

*, Zuverlässigkeit der Differenz ($p < 0,001$) der Werte vor und nach der Behandlung

P, Zuverlässigkeit der Differenzwerte Zuverlässigkeit der Unterschiede zwischen den Werten der Gruppen nach der Behandlung

Tabelle 3 Dynamik der HRDS- und HARS-Skalen unter dem Einfluss der Behandlung, $M \pm m$

Indikator	1st Gruppe $n = 25$		2nd-Gruppe $n = 25$		P
	Vor der Behandlung	Nach der Behandlung	Vor der Behandlung	Nach der Behandlung	
HRDS, Punkte	15.65 ± 1.	189.86 ± 1.44*15	.12 ± 1.226	.94 ± 1.09**	> 0.05
HARS, Punkte	19,87 ± 2,3811	,87 ± 1,26*18	,94 ± 1,386	,83 ± 1,25**	< 0,001

, Zuverlässigkeit der Differenz (, $p < 0,05$; **, $p < 0,01$) der Werte vor und nach der Behandlung

P, Zuverlässigkeit der Differenzwerte Zuverlässigkeit der Unterschiede zwischen den Werten der Gruppen nach der Behandlung

Tabelle 4 Indikatoren für den Blutfluss in den intrakraniellen Gefäßen unter dem Einfluss der Behandlung ($M \pm m$)

Indikatoren	1. Gruppe $n = 25$		2. Gruppe $n = 25$	
	Vor der Behandlung	Nach der Behandlung	Vor der Behandlung	Nach der Behandlung
Mittlere Großhirnarterien				
Systolische Geschwindigkeit, cm/s		90.26 ± 1.25		
Linke Seite		88.23 ± 1.27	86.72 ± 2.11	94.43 ± 1.23*
Rechte Seite	87.73 ± 2.14	85.50 ± 2.16	83.53 ± 2.20	96.20 ± 1.26*

Indikatoren der Angst- und Depressionsskalen HRDS und HARS, d. h. einen Rückgang der Manifestationen des ängstlich-depressiven Syndroms (Tabelle 3).

Bemerkenswert ist die Tatsache, dass die Behandlung mit HTT die Symptomatik der Angst am stärksten beeinflusst. Wenn es nach der Behandlung auf der Depressionsskala keine signifikanten Unterschiede zwischen den Werten in den Gruppen 1 und 2 gibt, dann gab es auf der Skala der Angst bei Patienten der Gruppe 2 eine deutlichere Verbesserung ($p < 0,001$).

Positive Veränderungen bei den Patienten wurden nach der Ernennung der Hochtontherapie in Bezug auf die zerebralen hämodynamischen Parameter beobachtet. Sie waren gekennzeichnet durch eine Zunahme der Geschwindigkeitsparameter des Blutflusses und eine Abnahme des peripheren Widerstands in einzelnen Gefäßen des Karotis- und Vertebrobasilären Beckens (Tabelle 4).

Wie aus Tabelle 4 hervorgeht, ist die Tendenz zur Verbesserung der zerebralen Durchblutung bei Patienten beider Gruppen zu beobachten.

Pulsationsindex, c.u				
Linke Seite	0.94 ± 0.02	0.90 ± 0.01	0.92 ± 0.02	0.90 ± 0.01
Rechte Seite	0.92 ± 0.01	0.88 ± 0.01	0.88 ± 0.03	0.80 ± 0.01*
Ventrals Hirnarterien				
Systolische Geschwindigkeit, cm/s				
Linke Seite	75.46 ± 1.20	75.76 ± 1.29	73.50 ± 1.21	74.82 ± 1.31
Rechte Seite	76.50 ± 1.21	75.29 ± 1.42	75.32 ± 1.33	76.36 ± 1.44
Pulsationsindex, c.u				
Linke Seite	0.88 ± 0.03	0.86 ± 0.01	0.87 ± 0.01	0.85 ± 0.02
Rechte Seite	0.86 ± 0.02	0.84 ± 0.01	0.86 ± 0.01	0.84 ± 0.03
Hintere HirngefäÙe				
Systolische Geschwindigkeit, cm/s				
Linke Seite	69.38 ± 1.32	71.36 ± 1.43	64.82 ± 1.34	66.42 ± 1.45
Rechte Seite	71.46 ± 1.33	72.28 ± 1.22	69.32 ± 1.31	72.55 ± 1.26*
Pulsationsindex, c.u				
Linke Seite	0.85 ± 0.01	0.84 ± 0.01	0.89 ± 0.03	0.84 ± 0.01
Rechte Seite	0.80 ± 0.02	0.77 ± 0.02	0.79 ± 0.04	0.69 ± 0.01*
Vertebralarterien (V4-Segment)				
Systolische Geschwindigkeit, cm/s				
Linke Seite	44,26 ± 1,23	Rechte Seite	45,30 ± 1,20	
				48.22 ± 1.26*
				47.34 ± 1.35
				45.82 ± 1.47*
				53.69 ± 1.57*
Pulsationsindex, c.u				
Linke Seite				0.92 ± 0.01
Rechte Seite				0.90 ± 0.01*
	0.95 ± 0.02	0.93 ± 0.03		0.85 ± 0.01*
Basilararterie				
Systolische Geschwindigkeit, cm/s		Systolische Geschwindigkeit, cm/s		Systolische Geschwindigkeit, cm/s
Pulsationsindex, c.u		Pulsationsindex, c.u		Pulsationsindex, c.u
Sinus rectus				
Systolische Geschwindigkeit, cm/s		Systolische Geschwindigkeit, cm/s		Systolische Geschwindigkeit, cm/s
Sinus rectus		Sinus rectus		Sinus rectus

*, Zuverlässigkeit der Differenz ($p < 0,05$) der Werte vor und nach der Behandlung

Bei den Patienten der Gruppe 1 war der Index jedoch statistisch signifikant ($p < 0,05$). Gleichzeitig traten bei den Patienten der Gruppe 2 nur bei zwei Indikatoren Veränderungen auf: der Blutflussgeschwindigkeit und der Pulsation der Arteria vertebralis und der Arteria basilaris in fast allen hämodynamischen Bereichen, mit Ausnahme der vorderen Hirnarterie, signifikante Veränderungen auf.

Arterien. So stieg die arterielle Blutflussgeschwindigkeit in den mittleren Hirnarterien und den Vertebralarterien (intrakranieller Abschnitt). In den Karotis- und VertebrobasilargefäÙen verringerte sich der periphere Widerstand gemäß dem Pulsationsindex und der Nivellierung der Anzeichen einer venösen Diskozirkulation aufgrund einer Verbesserung des venösen Abflusses entlang des Sinus rectus ($p < 0,05$). Es wird darauf hingewiesen, dass die signifikantesten Veränderungen in der Hämodynamik der rechten Gehirnhälfte auftraten. Es ist anzunehmen, dass

dies auf die anatomischen Besonderheiten bei der Platzierung der Elektroden während des Eingriffs zurückzuführen ist.

Bei der Analyse der Dynamik der EEG-Indikatoren wurden folgende Ergebnisse erzielt. Die kombinierte Hirnschädigung - organisch und funktionell - führte zu einer signifikanten Veränderung der elektrischen Hintergrundaktivität. Vor dem Hintergrund einer Abnahme des Alpha-Rhythmus in allen untersuchten Hirnregionen und der Theta- und Delta-Rhythmen wurden die Rhythmen

der verminderten Aktivität aufgezeichnet. Diese Rhythmen sind ein Indikator für die Verlangsamung der Arbeit der Großhirnrinde und die Dominanz der Aktivität der subkortikalen und Hirnstammstrukturen. Der primäre Indikator für den Rehabilitationserfolg ist die Verdrängung dieser Rhythmen und ihre Ersetzung durch den Alpha-Rhythmus [45].

Wie aus den Tabellen 5 und 6 hervorgeht, kommt es durch die Behandlung bei den Patienten beider Gruppen zu einer Abnahme der Aktivität des Delta- und Theta-Rhythmus. Die Zuverlässigkeit dieser Veränderungen wird jedoch nur bei Patienten der Gruppe 2 beobachtet.

Die Aktivität des Delta-Rhythmus nimmt in den frontalen und okzipitalen Bereichen signifikant ab, und dieser Rückgang wird in beiden Gehirnhälften festgestellt ($p < 0,05$).

Tabelle 5 Dynamik der Indikatoren der bioelektrischen Aktivität des Gehirns (μV) im Bereich des Delta-Rhythmus unter dem Einfluss der Behandlung ($M \pm m$)

Gehirnbereich	1. Gruppe $n = 25$		2. Gruppe $n = 25$	
	Vor der Behandlung		Nach der Behandlung	Nach der Behandlung
Frontalbereich				
Linke Hemisphäre				
Rechte Hemisphäre	0.72 ± 0.10	0.65 ± 0.08	0.73 ± 0.06	$0.60 \pm 0.05^*$
Zentraler Bereich	0.73 ± 0.09	0.70 ± 0.07	0.70 ± 0.09	$0.61 \pm 0.05^*$
Temporaler Bereich				
Linke Hemisphäre	0.72 ± 0.11	0.70 ± 0.09	0.73 ± 0.10	0.70 ± 0.09
Rechte Hemisphäre	0.74 ± 0.11	0.69 ± 0.09	0.71 ± 0.10	0.68 ± 0.08
Okzipitalbereich				
Linke Hemisphäre	0.67 ± 0.08	0.62 ± 0.06	0.63 ± 0.08	0.59 ± 0.05
Rechte Hemisphäre	0.66 ± 0.08	0.63 ± 0.08	0.62 ± 0.07	0.57 ± 0.05
Linke Hemisphäre	0.77 ± 0.07	0.76 ± 0.05	0.79 ± 0.05	$0.70 \pm 0.04^*$
Rechte Hemisphäre	0.86 ± 0.07	0.82 ± 0.05	0.86 ± 0.06	$0.72 \pm 0.05^*$

*, Zuverlässigkeit der ($p < 0,05$) Werte vor dem e und nach der Differenz der Behandlung

Tabelle 6 Dynamik der Indikatoren der bioelektrischen Gehirnaktivität (μV) im Theta-Rhythmusbereich unter dem Einfluss der Behandlung ($M \pm m$)

Gehirnbereich	1. Gruppe $n = 25$		2. Gruppe $n = 25$	
	Vor der Behandlung		Nach der Behandlung	Nach der Behandlung
Frontalbereich				
Linke Hemisphäre	0.75 ± 0.04	0.72 ± 0.03	0.74 ± 0.03	$0.63 \pm 0.03^{**}$
Rechte Hemisphäre	0.73 ± 0.06	0.72 ± 0.05	0.72 ± 0.06	$0.58 \pm 0.05^*$
Zentraler Bereich				
Linke Hemisphäre	1.09 ± 0.09	0.98 ± 0.09	1.05 ± 0.09	0.96 ± 0.09
Rechte Hemisphäre	0.92 ± 0.08	0.90 ± 0.08	0.95 ± 0.11	0.93 ± 0.08
Schläfenbereich				
Linke Hemisphäre	0.75 ± 0.07	0.71 ± 0.06	0.74 ± 0.06	$0.61 \pm 0.05^*$
Rechte Hemisphäre	0.70 ± 0.09	0.68 ± 0.07	0.70 ± 0.06	$0.59 \pm 0.05^*$
Okzipitalbereich				
Linke Hemisphäre	0.70 ± 0.09	0.68 ± 0.07	0.70 ± 0.06	$0.59 \pm 0.05^*$
Rechte Hemisphäre	0.85 ± 0.02	0.80 ± 0.03	0.85 ± 0.02	$0.78 \pm 0.03^*$

*, Zuverlässigkeit der Differenz ($p < 0,05$; **, $p < 0,01$) der Werte vor- und nach der Behandlung

Ähnlich verhält es sich mit dem Theta-Rhythmus. Auch hier kommt es zu einer signifikanten Abnahme der Aktivität in beiden Gehirnhälften. Im Gegensatz zum Delta-Rhythmus tritt die Abnahme der Aktivität des Theta-Rhythmus jedoch nicht nur in der frontalen und okzipitalen Zone, sondern auch in der temporalen Zone auf, was die positive Dynamik des Rehabilitationsprozesses bestätigt [46, 47].

Aus Tabelle 7 geht hervor, dass der Beta-1-Rhythmus vor der Behandlung nicht nur in den frontalen Regionen, sondern auch in den temporalen, parietalen und okzipitalen Regionen festgestellt wurde, was auf einen Zustand anhaltender psycho-emotionaler Spannung und diffuser zerebraler Störungen vor dem Hintergrund der Unterdrückung des kortikalen Hauptrhythmus der Ruhe hinweist.

Unter dem Einfluss der Behandlung wurde eine statistisch signifikante Abnahme des Index und der Stärke des Beta-1-Rhythmus (als Indikator für Stress) beobachtet. Bei den Patienten der Gruppe 1 waren die Veränderungen in der Stärke des Beta-1-Rhythmus statistisch nicht signifikant. Bei den Patienten der Gruppe 2 war die Verringerung der Leistung des Beta-1-Rhythmus in allen untersuchten Hirnregionen statistisch signifikant (die einzige Ausnahme war der frontale Bereich der rechten Hemisphäre).

Bei der Betrachtung der Wirkung der Hochtontherapie auf die Struktur der bioelektrischen Aktivität des Gehirns wurde besonderes Augenmerk auf die Dynamik des Alpha-Rhythmus, des wichtigsten EEG-Hintergrundrhythmus, gelegt [48] (Tabelle 8).

Wir sehen, dass bei den Patienten der Gruppe 1 die Veränderungen der Alpha-Rhythmus-Aktivität nicht nur statistisch unbedeutend, sondern auch multidirektional waren. Gleichzeitig wird bei den Patienten der Gruppe 2 ein signifikanter Anstieg der Aktivität des Alpha-Rhythmus in fast allen Zonen beider Hemisphären des Gehirns

Tabelle 7 Dynamik der Indikatoren der bioelektrischen Aktivität des Gehirns (μV) im Bereich des Beta-1-Rhythmus unter dem Einfluss der Behandlung ($M \pm m$)

Gehirnbereich	1. Gruppe $n = 25$		2. Gruppe $n = 25$		
	Vor der Behandlung		Nach der Behandlung	Vor der Behandlung	Nach der Behandlung
Frontalbereich					
Linke Hemisphäre	1.30 \pm 0.04		1.26 \pm 0.03	1.37 \pm 0.04	1.19 \pm 0.05***
Rechte Hemisphäre	1.23 \pm 0.04		1.21 \pm 0.02	1.28 \pm 0.04	1.26 \pm 0.02
Zentraler Bereich Linke					
Hemisphäre	1.85 \pm 0.05		1.80 \pm 0.04	1.95 \pm 0.05	1.84 \pm 0.04*
Rechte Hemisphäre	1.78 \pm 0.04		1.73 \pm 0.02	1.80 \pm 0.04	1.70 \pm 0.03*
Schläfenbereich					
Linke Hemisphäre	1.45 \pm 0.04		1.41 \pm 0.03	1.47 \pm 0.04	1.12 \pm 0.02***
Rechte Hemisphäre	1.50 \pm 0.04		1.46 \pm 0.02	1.46 \pm 0.05	1.19 \pm 0.05***
Okzipitalbereich					
Linke Hemisphäre	2.38 \pm 0.04		2.32 \pm 0.02	2.39 \pm 0.05	2.24 \pm 0.06*
Rechte Hemisphäre	2.37 \pm 0.06		2.28 \pm 0.05	2.40 \pm 0.06	2.25 \pm 0.005*

, Zuverlässigkeit der Differenz (, $p < 0,05$; **, $p < 0,01$; ***, $p < 0,001$) der Werte vor und nach der Behandlung

Tabelle 8 Dynamik der Indikatoren der bioelektrischen Gehirnaktivität (Hz) im Alpha-Rhythmusbereich unter dem Einfluss der Behandlung ($M \pm m$)

Gehirnbereich	1. Gruppe $n = 25$		2. Gruppe $n = 25$		
	Vor der Behandlung		Nach der Behandlung	Vor der Behandlung	Nach der Behandlung
Frontalbereich					
Linke Hemisphäre	9.83 \pm 0.06		9.85 \pm 0.07	9.85 \pm 0.06	9.89 \pm 0.07
Rechte Hemisphäre	9.93 \pm 0.07		9.97 \pm 0.08	9.91 \pm 0.06	9.99 \pm 0.08
Zentraler Bereich Linke					
Hemisphäre	9.85 \pm 0.07		9.86 \pm 0.05	9.86 \pm 0.05	9.95 \pm 0.04*
Rechte Hemisphäre	9.93 \pm 0.06		9.94 \pm 0.05	9.91 \pm 0.04	9.99 \pm 0.04*
Schläfenbereich					
Linke Hemisphäre	9.95 \pm 0.04		9.96 \pm 0.05	9.95 \pm 0.05	10.07 \pm 0.06*
Rechte Hemisphäre	10.12 \pm 0.06		10.16 \pm 0.04	10.11 \pm 0.03	10.19 \pm 0.04*
Okzipitalbereich					
Linke Hemisphäre	9.60 \pm 0.05		9.63 \pm 0.04	9.68 \pm 0.06	9.99 \pm 0.07***
Rechte Hemisphäre	9.90 \pm 0.05		9.94 \pm 0.04	9.89 \pm 0.05	10.18 \pm 0.06***

, Zuverlässigkeit der Differenz (, $p < 0,05$; **, $p < 0,01$; ***, $p < 0,001$) der Werte vor und nach der Behandlung

beobachtet.

Gehirn. Der signifikanteste Anstieg der Aktivität des Alpha-Rhythmus wurde in den parieto-occipitalen Regionen festgestellt. Die einzige Zone, in der kein signifikanter Anstieg der Aktivität des Alpha-Rhythmus zu verzeichnen war, ist die frontale Zone, in der der konkurrierende Einfluss des Beta-1-Rhythmus fortbesteht.

So kam es bei den Patienten der Gruppe 2 unter dem Einfluss der Behandlung zu einer statistisch signifikanten Abnahme des Index und der Leistung des Beta-1-Rhythmus (als Indikator für Stress), zu einer Abnahme des Index und der Leistung der Intensität der langsamen Delta- und Theta-Rhythmen und zu einer Zunahme des Index und der Leistung des Alpha-Rhythmus, als Indikator für die Normalisierung der Funktion der thalamischen Strukturen und des Kortex sowie der thalamokortikalen Beziehungen [49, 50].

Die vorliegende Studie weist einige Einschränkungen auf. Die erste ist der geringe Stichprobenumfang; größere Studien werden es ermöglichen, die Zuverlässigkeit der Ergebnisse zu klären. Die zweite Einschränkung ist das Alter der untersuchten Patienten ($29,43 \pm 5,86$). Weitere Untersuchungen zur Anwendung von HTT in anderen Altersgruppen könnten relevante Merkmale aufzeigen. Und schließlich ist das von uns verwendete HTT-Expositionsprotokoll ein einschränkender Faktor; es ist möglich, dass eine Änderung der Methodik zu anderen Ergebnissen führt, so dass wir eine Individualisierung in Abhängigkeit vom Ausgangszustand und der Dynamik der Rehabilitation empfehlen können.

Schlussfolgerungen

Die medizinische Rehabilitation von Patienten mit PTBS und den Folgen eines Schädel-Hirn-Traumas auf der Sanatoriumsstufe unter Verwendung der Hochtontherapie trägt zu einer signifikanten Verringerung der asthenisch-neurotischen ($p < 0,05$) und asthenisch-depressiven ($p < 0,01$) Syndrome bei und hat eine psycho-entspannende Wirkung beim Angstsyndrom ($p < 0,01$). Die Anwendung der Hochtontherapie im Behandlungskomplex trägt zur Verringerung der Schwere der pyramidalen Symptome und zur Rückbildung des vestibulären ataktischen Syndroms bei ($p < 0,05$). Die Anwendung der Hochtontherapie wurde von der Wiederherstellung der elastisch-tonischen Eigenschaften der Gefäßwand und der Verbesserung der zerebralen Durchblutung begleitet ($p < 0,05$). Unter dem Einfluss der Hochtontherapie kommt es zu einer positiven Dynamik der elektrophysiologischen Parameter bei Patienten mit PTBS und den Folgen von mTBI, nämlich zu einer Harmonisierung der bioelektrischen Aktivität des Gehirns in Form einer Abnahme des Intensitätsniveaus der langsamen

Rhythmen vor dem Hintergrund einer Zunahme der Frequenz und Intensität des Alpha-Rhythmus in beiden Hemisphären ($p < 0,05$). Somit kann die Technik der Hochtontherapie bei der komplexen Rehabilitation dieser Patienten in der Sanatoriumsphase empfohlen werden.

Beitrag der Autoren Alle Autoren waren an der Konzeption und Gestaltung der Studie beteiligt. Alle Autoren haben das endgültige Manuskript gelesen und genehmigt.

Finanzierung Diese Forschung wurde aus dem Budget der Forschungsarbeit "Entwicklung eines Systems zur Rehabilitation von Soldaten mit verschiedenen Verletzungen und Krankheiten in Sanatorien-Kurort-Bedingungen mit der Verwendung von natürlichen therapeutischen Faktoren", Nr. 0120U101626 staatliche Registrierung des Ministeriums für Gesundheit der Ukraine finanziert.

Datenverfügbarkeit Alle im Rahmen dieser Studie gewonnenen oder analysierten Daten sind in diesem veröffentlichten Artikel enthalten.

Erklärungen

Ethikgenehmigung Alle Verfahren, die in Studien mit menschlichen Teilnehmern durchgeführt wurden, entsprachen den ethischen Standards des institutionellen und/oder nationalen Forschungsausschusses und der Deklaration von Helsinki von 1964 und ihren späteren Änderungen oder vergleichbaren ethischen Standards.

Einwilligung nach Aufklärung Die Studie wurde vom Bioethikkomitee der staatlichen Institution "Ukrainisches Forschungsinstitut für medizinische Rehabilitationstherapie des Gesundheitsministeriums der Ukraine" genehmigt, Protokoll Nr. 5 vom 23.02.2021. Alle Patienten haben ihre informierte Zustimmung zur Teilnahme an der Forschungsstudie gegeben.

Interessenkonflikt Die Autoren erklären, dass sie keine konkurrierenden Interessen haben.

Referenzen

1. Babov KD, Pinchuk I.Ya, Stenlyuk VV (2015) Rehabilitation von Opfern von Notfällen und Feindseligkeiten. Post-traumatische Belastungsstörung. Polygraph, Odessa [auf Ukrainisch]
2. Brenner LA, Ivins BJ, Schwab K, Warden D, Nelson LA, Jaffee M et al (2010) Traumatic brain injury, posttraumatic stress disorder, and postconcussive symptom reporting among troops returning from Iraq. *J Head Trauma Rehabil* 25(5):307-312
3. Fear NT, Jones E, Groom M, Greenberg N, Hull L, Hodgetts TJ et al (2009) Symptome des postkonkussionalen Syndroms stehen in unspezifischem Zusammenhang mit leichten traumatischen Hirnverletzungen bei Angehörigen der britischen Streitkräfte nach der Rückkehr aus dem Irak-Einsatz: eine Analyse selbstberichteter Daten. *Psychol Med* 39(8):1379-1387
4. Hruby A, Lieberman HR, Smith TJ (2021) Symptome von Depression, Angst und posttraumatischer Belastungsstörung und ihre Beziehung zu gesundheitsbezogenem Verhalten bei mehr als 12.000 US-Militärangehörigen: bidirektionale Zusammenhänge. *J Affect Disord* 283:84-93

5. Kerr NC, Ashby S, Gerardi SM, Lane SJ (2020) Occupational therapy for military personnel and military veterans experiencing post-traumatic stress disorder: a scoping review. *Aust Occup Ther J* 67(5):479-497
6. LeardMann CA, Smith TC, Smith B, Wells TS, Ryan MAK, Millennium Cohort Study Team (2009) Baseline self reported functional health and vulnerability to post-traumatic stress disorder after combat deployment: prospective US military cohort study. *Br Med J* 338:b1273
7. Gaydabrus A (2020) Komplexe posttraumatische Belastungsstörung bei Teilnehmern der Militäraktionen in der Operation Militärgruppen. *Eur Neuropsychopharmacol* 40:347-348
8. Otto JL, Smolenski DJ, Stewart L, Workman DE, Kincaid M, Belsher BE et al (2021) Angehörige der Kampfmittelbeseitigungsdienste des US-Militärs haben ein höheres Risiko für Schlaflosigkeit und posttraumatische Belastungsstörung: eine große retrospektive Kohortenstudie. *Ann Epidemiol* 57:40-45
9. Proessler F, Dretsch MN, Connaboy C, Lovalekar M, Dunn-Lewis C, Canino MC et al (2020) Strukturelle Störungen des Konnektoms bei Militärangehörigen mit leichter traumatischer Hirnverletzung und posttraumatischer Belastungsstörung. *J Neurotrauma* 37(19):2102-2112
10. Babov K, Korshnyak V, Gushcha S, Nasibullin B, Plakida A (2022) Posttraumatische Belastungsstörung, kompliziert durch ein leichtes Kampfkontusionstrauma: klinische Merkmale. *J Neurosurg Sci* 66(4):380-382
11. Simmons AN, Matthews SC (2012) Neural circuitry of PTSD with or without mild traumatic brain injury: a meta-analysis. *Neuropharmacology* 62(2):598-606
12. Karr JE, Areshenkoff CN, Garcia-Barrera MA (2014) The neuropsychological outcomes of concussion: a systematic review of meta-analyses on the cognitive sequelae of mild traumatic brain injury. *Neuropsychologie* 28(3):321-336
13. Merritt VC, Jurick SM, Sakamoto MS, Crocker LD, Sullan MJ, Hoffman SN et al (2020) Post-concussive symptom endorsement and symptom attribution following remote mild traumatic brain injury in combat-exposed veterans: an exploratory study. *J Psychiatr Res* 130:224-230
14. Phipps H, Mondello S, Wilson A, Dittmer T, Rohde NN, Schroeder PJ et al (2020) Characteristics and impact of US military blast-related mild traumatic brain injury: a systematic review. *Front Neurol* 11:e559318
15. Vasterling JJ, Brailey K, Proctor SP, Kane R, Heeren T, Franz M (2012) Neuropsychological outcomes of mild traumatic brain injury, post-traumatic stress disorder and depression in Iraqdeployed US Army soldiers. *Br J Psychiatry* 201(3):186-192
16. Georgina G, Perez GM, De Gasperi R, Sosa MAG, Otero-Pagan A, Pryor D et al (2021) Progressive kognitive und mit posttraumatischer Belastungsstörung zusammenhängende Verhaltensmerkmale bei Ratten, die wiederholten schwachen Explosionen ausgesetzt waren. *J Neurotrauma* 38(14):2030-2045
17. Koliatsos VE, Rao V (2020) The behavioral neuroscience of traumatic brain injury. *Psychiatr Clin North Am* 43(2):305
18. Rosenfeld JV, Ford NL (2010) Bombenexplosion, leichtes Schädel-Hirn-Trauma und psychiatrische Morbidität: ein Überblick. *Injury Int J Care Inj* 41(5):437-443
19. Smith TC, Ryan MAK, Wingard DL, Slymen DJ, Sallis JF, KritzSilverstein D et al (2008) New onset and persistent symptoms of post-traumatic stress disorder self reported after deployment and combat exposures: prospective population based US military cohort study. *BMJ Br Med J* 336(7640):366-371
20. Likhterman LB (2014) Traumatische Hirnverletzung. Diagnostik und Behandlung. *Geotar-Media, Moscou, S. 504* [auf Russisch]
21. Cafin OD, Balabushka YO (2016) Individuelle psychologische Merkmale und Schwere der posttraumatischen Belastungsstörung als Grundlage für den Erfolg der psychologischen Rehabilitation von Kämpfern. *Probl Extreme Crisis Psychol* 19:171-183 [inUkrainian]
22. Kaplan GB, Vasterling JJ, Vedak PC (2010) Brain-derived neurotrophic factor in traumatic brain injury, post-traumatic stress disorder, and their comorbid conditions: role in pathogenesis and treatment. *Behav Pharmacol* 21(5-6):427-437
23. Lippa SM, Gill J, Brickell TA, French LM, Lange RT (2021) Blood biomarkers relate to cognitive performance years after traumatic brain injury in service members and veterans. *J Int Neuropsychol Soc* 27(5):508-514
24. van Vliet EA, Ndode-Ekane XE, Lehto LJ, Gorter JA, Andrade P, Aronica E et al (2020) Lang anhaltende Dysfunktion der Blut-Hirn-Schranke und Neuroinflammation nach traumatischen Hirnverletzungen. *Neurobiol Dis* 145:e105080
25. Calviello LA, Donnelly J, Zeiler FA, Thelin EP, Smielewski P, Czosnyka M (2017) Cerebral autoregulation monitoring in acute traumatic brain injury: what's the evidence? *Minerva Anestesiol* 83(8):844-857
26. Rasulo FA, Transcranial BR (2019) Doppler- und Sehnervensonographie. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 33:38-52
27. Blanco P, Abdo-Cuza A (2018) Transkranieller Doppler-Ultraschall in der neurokritischen Pflege. *J Ultrasound* 21(1):1-16
28. Robba C, Goffi A, Geeraerts T, Cardim D, Via G, Czosnyka M, Park S et al (2019) Brain ultrasonography: methodology, basic and advanced principles and clinical applications. A narrative review. *Intensive Care Med* 45(7):913-927
29. Cooper DB, Bunner AE, Kennedy JE, Balldin V, Tate DF, Eapen BC et al (2015) Treatment of persistent post-concussive symptoms after mild traumatic brain injury: a systematic review of cognitive rehabilitation and behavioral health interventions in military service members and veterans. *Brain Imaging Behav* 9(3):403-420
30. Heslot C, Cogne M, Guillouet E, Perdrieau V, Lefevre-Dognin C, Glize B et al (2021) Management von ungünstigen Ergebnissen nach einem leichten Schädel-Hirn-Trauma: Überprüfung der physischen und kognitiven Rehabilitation und der psychologischen Betreuung beim postkonkussiven Syndrom. *Neurochirurgie* 67(3):283-289
31. MacGregor AJ, Shannon KB, Dougherty AL (2021) Time since injury as a factor in post-concussion symptom reporting among military service members with blast-related concussion. *J Neurotrauma* 38(17):2447-2453
32. Mahoney EJ, Silva MA, Reljic T, Dams-O'Connor K, Hammond FM, Monden KR et al (2021) Rehabilitation needs at 5 years posttraumatic brain injury: a VA TBI model systems study. *J Head Trauma Rehabil* 36(3):175-185
33. Moore BA, Pujol L, Waltman S, Shearer DS (2021) Management der posttraumatischen Belastungsstörung bei Veteranen und Militärangehörigen: ein Überblick über pharmakologische und psychotherapeutische Interventionen seit 2016. *Curr Psychiatry Rep* 23(2):e9
34. Opie GM, Foo N, Killington M, Ridding MC, Semmler JG (2019) Transcranial magnetic stimulation-electroencephalography measures of cortical neuroplasticity are altered after mild traumatic brain injury. *J Neurotrauma* 36(19):2774-2784
35. Mu WY, Catenaccio E, Lipton ML (2017) Neuroimaging in blast-related mild traumatic brain injury. *J Head Trauma Rehabil*

- 32(1):55-69
36. Fickling SD, Greene T, Greene D, Frehlick Z, Campbell N, Etheridge T et al (2020) Brain vital signs detect cognitive improvements during combined physical therapy and neuromodulation in rehabilitation from severe traumatic brain injury: a case report. *Front Hum Neurosci* 14:e347
 37. Shmakova IP, Afanasyeva Ya S (2004) Anwendung der Hochtontherapie in der Rehabilitation von Patienten mit Kreislaufstörungen im Stadium I - II. *Int J Immunorehabil* 6(1):178-179 [auf Russisch]
 38. Shmakova IP, Panina SO (2020) Die Wirkung der Hochtontherapie auf klinische und neurofunktionelle Parameter bei Patienten mit Bluthochdruck mit Enzephalopathie und gleichzeitigem Diabetes. *Bull Mar Med* 1:95-99 [inUkrainian]
 39. Schaffler-Schaden D, Sassmann R, Johansson T, Gampenrieder SP, Rinnerthaler G, Lampl K et al (2020) Comparison of high tone therapy and transcutaneous electrical nerve stimulation therapy in chemotherapy-induced polyneuropathy. *Medizin (Baltimore)* 99(19):e20149
 40. Ogrodzka-Ciechanowicz K, Glab G, Slusarski J, Gadek A (2021) Wiederherstellung der Quadrizeps-Muskelkraft mit Hilfe von Hochton-Krafttherapie nach Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes: eine randomisierte kontrollierte Studie. *BMC Musculoskelet Disord* 22(1):975
 41. Guelfi JD (ed) (1993) L'évaluation clinique standardisée en psychiatrie. Boulogne: Editions Médicales Pierre Fabre
 42. Zigmond AS, Snaith AS (1983) The hospital anxiety and depression scale. *Acta Psychiatr Scand* 67:361-370
 43. Kaltainen H, Helle L, Liljestrom M, Renvall H, Forss N (2018) Theta-band oscillations as an indicator of mild traumatic brain injury. *Brain Topogr* 31(6):1037-1046
 44. Kubsik A, Klimkiewicz P, Klimkiewicz R, Jankowska K, Jankowska A, Woldanska-Okonska M (2014) Wpływ terapii energotonowej na stan funkcjonalny chorych na stwardnienie rozsiane. [Der Einfluss der Hochton-Power-Therapie auf den funktionellen Status von Patienten mit Multipler Sklerose]. *Polski merkuriusz lekarski* 37(217):24-29
 45. Sheerin CM, Franke LM, Aggen SH, Amstadter AB, Walker WC (2018) Evaluating the contribution of EEG power profiles to characterize and discriminate posttraumatic stress symptom factors in a combat-exposed population. *Clin EEG Neurosci* 49(6):379-387
 46. Wei H, Chang L, Huang Q, Zhou RL (2020) Relation zwischen spontanem elektroenzephalographischem Theta/Beta-Leistungsverhältnis und Prüfungsangst. *Neurosci Lett* 73:135323
 47. Wen TY, Bani NA, Muhammad-Sukki F, Aris SAM (2020) Electroencephalogram (EEG) human stress level classification based on theta/beta ratio. *Int J Integr Eng* 12(6):174-180
 48. Lewine JD, Plis S, Ulloa A, Williams C, Spitz M et al (2018) Quantitative EEG-Biomarker für leichte traumatische Hirnverletzungen. *J Klinische Neurophysiol* 36(4):298-305
 49. Pauli R, O'Donnell A, Cruse D (2020) Resting-State-Elektroenzephalographie zur Prognose von Bewusstseinsstörungen nach traumatischen Hirnverletzungen. *Front Neurol* 11:e586945
 50. Tolonen A, Sarkela MOK, Takala RSK, Katila A, Frantzen J, Posti JP et al (2018) Quantitative EEG-Parameter zur Vorhersage des Ergebnisses bei schweren traumatischen Hirnverletzungen: Entwicklungsstudie. *Clin EEG Neurosci* 49(4):248-257

Hinweis des Herausgebers Springer Nature bleibt neutral in Bezug auf Rechtsansprüche in veröffentlichten Karten und institutionelle Zugehörigkeiten.

Springer Nature oder sein Lizenzgeber (z.B. eine Gesellschaft oder ein anderer Partner) hält die ausschließlichen Rechte an diesem Artikel im Rahmen eines Veröffentlichungsvertrags mit dem/den Autor(en) oder anderen Rechteinhaber(n); die Selbstarchivierung der akzeptierten Manuskriptversion dieses Artikels durch den Autor unterliegt ausschließlich den Bedingungen eines solchen Veröffentlichungsvertrags und dem geltenden Recht.