

УДК: [617.57/58-001.4-02:355.01]:616-089.844:018.1"712.4":616-073.432.19  
 HTTPS://DOI.ORG/10.37647/2786-7595-2023-117-2-26-31

## Оцінка впливу клітинних технологій на денерваційно-реінерваційні процеси у м'язах внаслідок вогнепального ураження при УЗД з еластографією зсувної хвилі (SWE)

Долгополов О.В.<sup>1</sup>, Зінченко В.В.<sup>1</sup>✉, Ярова М.Л.<sup>1</sup>, Сіфоров Д. В.<sup>1</sup>,  
 Гайко О.Г.<sup>2</sup>, Климчук Л.І.<sup>2</sup>, Лучко Р.В.<sup>2</sup>

**Резюме. Мета:** об'єктивно оцінити можливості УЗД м'язів з еластографією зсувної хвилі (SWE) при оцінці впливу клітинних технологій на денерваційно-реінерваційні процеси у м'язах внаслідок вогнепального ураження. **Матеріал і методи.** Ультразвукове дослідження та еластографію зсувної хвилі (SWE) проводили на апараті LOGIQ P9 GE Healthcare з мультичастотним датчиком 5-12 МГц. Обстежено 19 поранених чоловіків у віці 35-57 років (середній вік – 45,31 ± 0,95 років) із денерваційно-реінерваційними процесами у м'язах внаслідок вогнепального ураження. Обстеження проводили на ураженій та на контрлатеральній здоровій кінцівці. Статистичну обробку проводили в Microsoft Excel та StatSoft Inc. STATISTICA. **Результати.** В дослідженні приймали участь 11 чоловіків з ураженнями променевого нерва на верхній кінцівці та 8 чоловіків з ураженням малогомілкового нерва на гомілиці. При ураженнях променевого нерва ми обстежували т. extensor digitorum на передпліччі. При ураженнях малогомілкового нерву обстежували т. tibialis anterior гомілки. Після обстеження всім пацієнтам виконували процедуру введення ВМАС (Bone Marrow Aspirate Concentrate) в цільовий м'яз. Контрольні дослідження еластографії зсувної хвилі проводили повторно пацієнтам через 1 місяць після процедури. Отримані статистичні дані стану жорсткості м'язів в динаміці дозволяють зробити висновки про достовірно позитивний вплив проведеного лікування. **Висновки.** УЗД м'язів з еластографією зсувної хвилі є достовірним та інноваційним методом отримання інформації про стан жорсткості м'язів при оцінці впливу клітинних технологій на денерваційно-реінерваційні процеси у хворих після вогнепального ураження.

**Ключові слова:** УЗД; еластографія зсувної хвилі (SWE); клітинні технології; денерваційно-реінерваційні процеси; вогнепальна травма; жорсткість м'язів.

**Ключові слова:** проксимальний стегновий стрижень; переломи вертлюгової зони стегнової кістки; хірургічне лікування; інтрамедулярний остеосинтез із блокуванням; рання реабілітація.

### Вступ

Потреба в неінвазивній візуалізації та оцінці м'язів в ортопедії та травматології постійно зростає, особливо зросло використання ультразвуку в В-режимі та в режимі доплерівського картування [1, 2,8].

Постійний розвиток ультразвукових технологій спонукав до створення ультразвукової еластографії – передової технології, яка безпосередньо

призначена для дослідження ступеня жорсткості тканин, включаючи жорсткість м'язів. Еластометрія в поєднанні зі зростаючим клінічним інтересом дослідження м'язової патології в ортопедії та травматології може надати додаткову корисну інформацію щодо фізіологічного та біомеханічного стану м'язів. Такий вид еластографії як еластографія зсувної хвилі (SWE) в режимі реального часу стає новим неінвазивним методом для оцінки фіброзу та дегенерації в м'язах, сухожилках та нервах, який ґрунтувався на кількісному вимірюванні [9,10,11].

Клінічне значення SWE стає одним із провідних та визнаних інструментальних методів дослідження дегенеративних змін в м'язах, сухожилках та нервах. Також було показано тісну кореляцію

✉<sup>1</sup> Зінченко В.В., vzinchenko@ukr.net

<sup>1</sup>ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України», Київ, Україна, відділення важкої поліструктурної травми.

<sup>2</sup>ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України», Київ, Україна, відділ функціональної діагностики

жорсткості в м'язах, сухожилках та нервах з дегенеративним процесом [12,13,14].

На наш погляд прямі вимірювання м'язової жорсткості в реальному часі можуть допомогти в діагностиці та реабілітації, як гострих травм опорно-рухового апарату, так і хронічного дегенеративного процесу. Це також може допомогти відстежувати результати оперативних утручань та лікувальних процедур, що впливають на м'язи при захворюваннях та травмах нервово-м'язової та опорно-рухової системи, і може краще інформувати про функціональний прогноз, простежити динаміку дегенеративного процесу та оцінити ефективність лікування. Зважаючи на збільшення кількості тяжких поліструктурних травм верхніх та нижніх кінцівок внаслідок війни в Україні, а також на неінвазивність, малозатратність та можливість динамічного моніторингу, застосування еластографії є важливими для подальшого успішного клінічного впровадження.

Еластометрія як метод передбачає отримання цифрових значень жорсткості в кПа контрольного об'єму (КО). Лікар може довільно провести оптимальну навігацію КО, обійти артефакти та отримати достовірну та надійно відтворену кількісну інформацію про жорсткість ділянки м'язу [21,7]. У нашому дослідженні ми використали еластографію зсувної хвилі.

Метою дослідження було визначення можливостей використання еластографії зсувної хвилі для оцінки денерваційно-реінерваційних процесів у м'язах внаслідок вогнепального ураження під впливом лікування з допомогою клітинних технологій (Bone Marrow Aspirate Concentrate).

## Матеріали і методи

Еластографія зсувної хвилі (SWE) проводилась на сканері LOGIQ P9 GE Healthcare з мультисигментним датчиком 5-12 МГц. Обстежено 19 поранених чоловіків у віці 35-57 років (середній вік –  $45,31 \pm 7,48$  років) із аксонотмезисом маломілкового та променевого нерва внаслідок вогнепального ураження і денерваційно-реінерваційними процесами у м'язах. Обстеження проводили на ураженій та на контрлатеральній здоровій кінцівці.

В дослідженні приймали участь дві групи поранених: 11 чол. з ураженням променевого нерва та 8 чол. з ураженням маломілкового. При ураженнях променевого нерва обстежували *m. extensor digitorum* на передпліччі вибираючи середню частину м'язу. При ураженнях маломілкового нерва для обстеження обирали середню третину *m. tibialis anterior* гомілки. Датчик розташовували поздовжньо до довгої осі м'язу. Вимірювання

реєстрували в найширшій і найтовстішій частині м'язового черевця. Датчик не тиснув. Кожен м'яз сканували в розслабленому стані тричі, було проаналізовано середнє значення. Для адекватного поширення зсувної хвилі, ультразвуковий перетворювач повинен бути паралельним м'язовому волокну, щоб мати можливість кількісно визначити жорсткість м'язів.

Ми брали область інтересу за шкалою кольорового картування, що дозволяло навігацію КО для кількісного вимірювання в кПа діаметром 4 мм. на ехограмі в центральній частині м'язу. Відмінності вважалися статистично значущими при  $p < 0,05$ . Дані були статистично проаналізовані за допомогою Microsoft Excel та StatSoft Inc. STATISTICA.

Після обстеження всім пацієнтам виконували процедуру введення ВМАС (Bone Marrow Aspirate Concentrate) концентрату аспірату кісткового мозку в цільовий м'яз, контрольні дослідження еластографії зсувної хвилі проводили повторно пацієнтам через 1 місяць після процедури.

Результати та їх обговорення ВМАС – концентрат аспірату кісткового мозку, аспірується з гребеня клубової кістки шляхом пункції, потім відбувається процедура центрифугування, щоб сконцентрувати білки та лікувальні фактори. Аспірат кісткового мозку був очищений від частинок глибокої кістки за допомогою Tulip® Emulsifier™ фільтр аспірату підшкірної жирової клітковини. Зазвичай отримували до 2 мл. аспірату кісткового мозку. [3,4,5,8].

Очищений аспірат кісткового мозку вводили під контролем УЗД в *m. extensor digitorum* на передпліччі при ураженнях променевого нерва та в *m. tibialis anterior* гомілки при ураженнях маломілкового нерва (рис 1.).

Відповідно при ураженнях променевого нерва проводили еластографію зсувної хвилі *m. extensor digitorum* на передпліччі вибираючи середню частину м'язу до введення ВМАС та через 1 міс. після процедури. При ураженнях маломілкового нерва для обстеження обирали середню третину *m. tibialis anterior* гомілки.

Ми навмисно взяли середні значення по групах в цілому до та після лікування, оскільки покращення отримали у всіх пацієнтів. Детальні значення жорсткості уражених м'язів *m. extensor digitorum* на передпліччі та в *m. tibialis anterior* гомілки (кПа) до та через 1 місяць після введення ВМАС представлені в таблиці №1, 2.

При порівняннях середніх значень вимірювань уражених м'язів *m. tibialis anterior* гомілки і *m. extensor digitorum* на передпліччі (таблиці 1 та 2) до та після лікування спостерігали достовірну відмінність в сторону зменшення щільності м'язової

Таблиця №1

Еластометрія m. tibialis anterior	Середнє значення (кПа)	Std.Dv.	Diff.	Std.Dv. Diff.	t	df	p
До лікування	119,6150	9,370173					
Після лікування	99,8200	3,388569	19,79500	8,210180	6,819426	7	0,000249

Таблиця №2

Еластометрія m. extensor digitorum	Середнє значення (кПа)	Std.Dv.	Diff.	Std.Dv. Diff.	t	df	p
До лікування	139,6936	14,48825					
Після лікування	113,4127	15,85320	26,28091	12,54572	6,947703	10	0,000040

тканини, що може бути оцінено як позитивний результат лікування.

Рисунок №1 показує зразок вимірювання еластичності m. extensor digitorum на передпліччі пацієнта А 44 років після вогнепального осколкового сліпого поранення лівого плеча та передпліччя з вогнепальним переломом н/3 лівої плечової кістки та в/3 променевої кістки. Стан після металоостеосинтезу лівої плечової кістки. Посттравматична невропатія променевого нерва лівої верхньої кінцівки.

Рисунок №2 показує зразок вимірювання еластичності m. tibialis anterior на гомілці пацієнта П 43 років з наслідками осколкового поранення, консолюючий відкритий перелом верхньої 1/3 лівої великогомілкової кістки з наявністю АЗФ. Післятравматична невропатія малогомілкового, частково великогомілкового нервів у вигляді нижнього лівобічного периферичного монопарезу стопи.

Ми вивчали м'язи m. tibialis anterior на гомілці та m. extensor digitorum на передпліччі у здорових дорослих суб'єктів методом SWE. В нормі середня жорсткість m. tibialis anterior на гомілці у нашому дослідженні була наступною:  $15,58 \pm 1,60$  кПа, m.

extensor digitorum на передпліччі  $30,04 \pm 2,22$  кПа (таблиця №3).

Таблиця №3

Локалізація вимірювань еластографії м'язів в нормі	Середнє значення (кПа)	$\pm$ SD	$\pm$ SE
m. extensor digitorum на передпліччі	30,04182	2,220909	0,669629
m. tibialis anterior	15,585	1,606131	0,567853

Ми не знайшли опублікованих досліджень саме щодо SWE вимірювань m. tibialis anterior та m. extensor digitorum на передпліччі, проте дані щодо інших м'язів в літературі досить різноманітні. Це можна пояснити використанням різних ультразвукових систем. Існує різноманітність у вимірюваннях еластичності різних м'язів у різних дослідженнях у стані спокою від 3,1 до 42,8 кПа. [ 24 ]. Також вимірювання з різними положеннями кінцівок у спортсменів дає різні вимірювання еластичності. [ 25, 26].

Ми помітили що важливий стан м'яза під час обстеження, тобто він перебуває у стані спокою

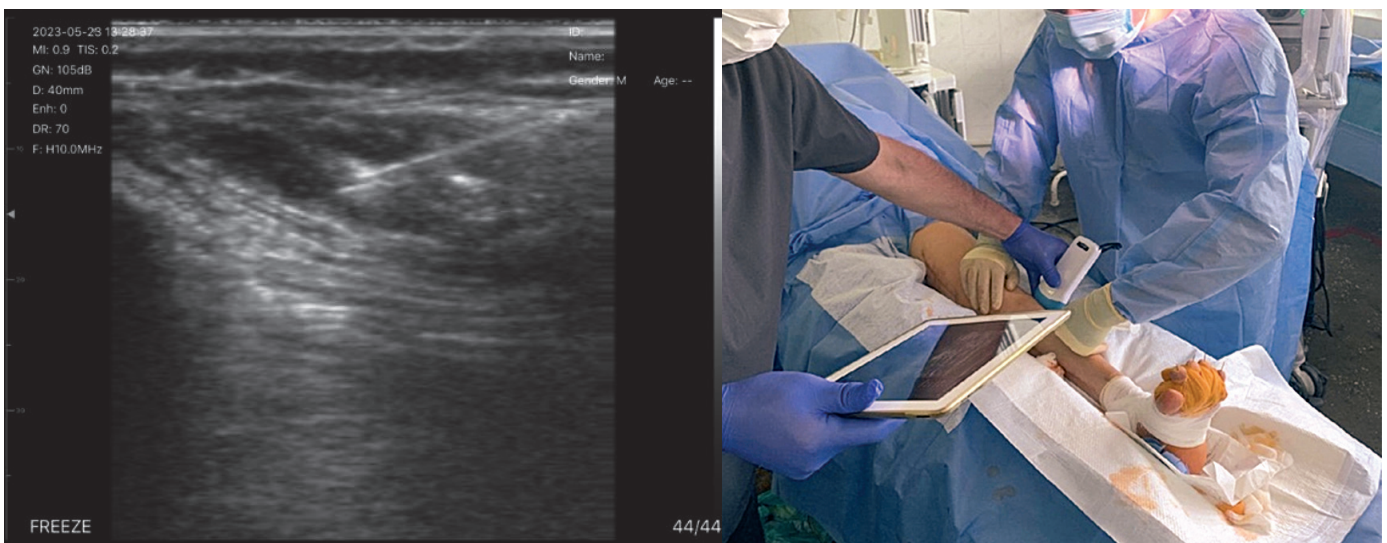
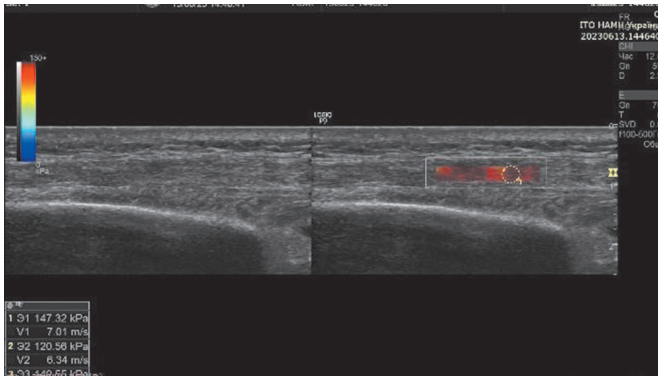


Рис. № 1. Процедура введення ВІМАС в m. tibialis anterior гомілки під УЗД контролем.





**Рис. №1.** Еластограма *m. extensor digitorum* Dex хворого А. після вогнепального осколкового поранення лівого плеча та передпліччя, посттравматична невропатія променевого нерва лівої верхньої кінцівки

чи скорочення. Іншою причиною може бути використання метрів на секунду як параметра для вимірювань жорсткості замість кПа, що може призвести до різниці в результатах.

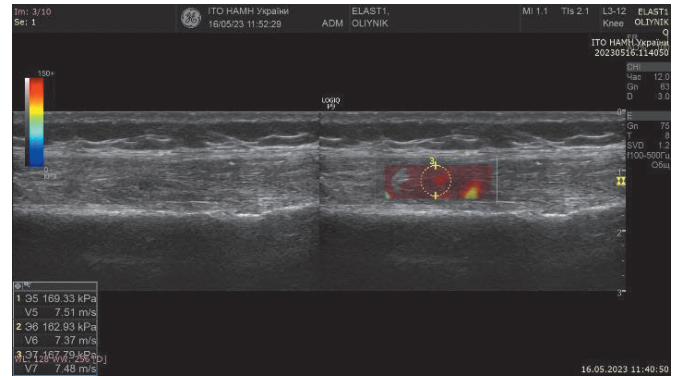
Це дослідження має кілька обмежень. По-перше, розмір вибірки був невеликим, лише 19 суб'єктів відповідали критеріям вимірювань. Це може обмежити надійність і статистичну значущість наших результатів. По-друге, це відсутність стандартизації стадії патологічного процесу тканин. Майбутні дослідження слід проводити з більшим розміром вибірки, з стандартизацією стадії патологічного процесу м'язу.

Проте наша піонерська робота в дослідженні можливості УЗД м'язів з еластографією зсувної хвилі при оцінці впливу клітинних технологій на ішемічні та денерваційно-реінерваційні процеси у м'язах внаслідок вогнепального ураження показала достовірне зменшення щільності (фіброзу та дегенерації) м'язів після проведеного лікування, що свідчить про позитивні результати відновлення в динаміці та цікаві подальші перспективи широкого застосування методу.

Отже, результати, отримані в нашому дослідженні, можуть бути використані для оцінки денерваційно-реінерваційних процесів у м'язах внаслідок вогнепального ураження під впливом лікування з допомогою клітинних технологій та бути орієнтиром для майбутніх досліджень, що розглядають різні патології м'язів.

## Висновки

1. УЗД м'язів з еластографією зсувної хвилі при оцінці впливу клітинних технологій на денерваційно-реінерваційні процеси у м'язах внаслідок вогнепального ураження показала достовірне



**Рис. №2.** Еластометрія *m. tibialis anterior* на голі хворого О. з наслідками осколкового поранення, післятравматична невропатія малогомілкового нерва

зменшення щільності м'язів тобто фіброзу та дегенерації в процесі лікування, що свідчить про позитивні результати відновлення в динаміці.

2. Ефективність еластометрії методом SWE в режимі реального часу залежить від суворого дотримання процедури виконання з урахуванням пацієнт-апарат- та оператор залежних факторів.

3. Метод SWE у поєднанні з В-режимом повинен стати рутинним для широкого застосування у визначенні денерваційно-реінерваційних процесів у м'язах в тому числі внаслідок вогнепального ураження.

4. Ґрунтуючись на попередніх результатах цього дослідження, можна припустити, що УЗД з еластографією зсувної хвилі є інноваційним методом кількісної оцінки локальної жорсткості (фіброзу та дегенерації) м'язів при денерваційно-реінерваційних процесах.

## References

1. Paramalingam S, Needham M, Bulsara M, Mastaglia FL, Keen HI. The longitudinal study of muscle changes with ultrasound: Differential changes in idiopathic inflammatory myopathy subgroups [published online ahead of print, 2023 May 24]. *Rheumatology (Oxford)*. 2023;kead239. doi:10.1093/rheumatology/kead239
2. Hernández-Socorro CR, Saavedra P, López-Fernández JC, Ruiz-Santana S. Assessment of Muscle Wasting in Long-Stay ICU Patients Using a New Ultrasound Protocol. *Nutrients*. 2018;10(12):1849. Published 2018 Dec 1. doi:10.3390/nu10121849
3. Kim GB, Seo MS, Park WT, Lee GW. Bone Marrow Aspirate Concentrate: Its Uses in Osteoarthritis. *Int J Mol Sci*. 2020;21(9):3224. Published 2020 May 2. doi:10.3390/ijms21093224
4. Lysak A, Savosko S, Strafun S, Utiko N, Makarenko O. Effect of bone marrow aspirate in denervation-induced skeletal muscle atrophy. *Wiad Lek*. 2022;75(3):634-640.

5. Gaiovych I, Savosko S, Labunets I, Utko N, Makarenko A, Chaikovskiy Y. Sciatic nerve regeneration after autografting and application of the bone marrow aspirate concentration. *Georgian Med News*. 2019;(295):145-152.
6. Xiang Y, Dai J, Xu L, Li X, Jiang J, Xu J. Research progress in immune 2021;287:120117. doi:10.1016/j.lfs.2021.120117
7. Study of bone marrow aspirate injection effect on denervated muscle according to electromyography studies *Eureka:Health sciences – T6 – №30. – 2020 – C.40-47*
8. Nenadic I, Urban M, Greenleaf JF et al (2019) Ultrasound elastography for biomedical applications and medicine, 1st edn. Wiley, Hoboken, NJ.
9. Zúñiga LDO, López CAG, González ER. Ultrasound Elastography in the Assessment of the Stiffness of Spastic Muscles: A Systematic Review. *Ultrasound Med Biol*. 2021;47(6):1448-1464. doi:10.1016/j.ultrasmedbio.2021.01.031
10. Ryu J, Jeong WK. Current status of musculoskeletal application of shear wave elastography. *Ultrasonography*. 2017;36(3):185-197. doi:10.14366/usg.16053
11. Snoj Ž, Wu CH, Taljanovic MS, Dumić-Čule I, Drakonaki EE, Klausner AS. Ultrasound Elastography in Musculoskeletal Radiology: Past, Present, and Future. *Semin Musculoskelet Radiol*. 2020;24(2):156-166. doi:10.1055/s-0039-3402746
12. Zúñiga LDO, López CAG, González ER. Ultrasound Elastography in the Assessment of the Stiffness of Spastic Muscles: A Systematic Review. *Ultrasound Med Biol*. 2021;47(6):1448-1464. doi:10.1016/j.ultrasmedbio.2021.01.031
13. Miller T, Ying M, Sau Lan Tsang C, Huang M, Pang MYC. Reliability and Validity of Ultrasound Elastography for Evaluating Muscle Stiffness in Neurological Populations: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Phys Ther*. 2021;101(1):pzaa188. doi:10.1093/ptj/pzaa188
14. Liu J, Pan H, Bao Y, Zhao Y, Huang L, Zhan W. The Value of Real-Time Shear Wave Elastography before and after Rehabilitation of Upper Limb Spasm in Stroke Patients. *Biomed Res Int*. 2020;2020:6472456. Published 2020 Aug 18. doi:10.1155/2020/6472456
15. Leng Y, Wang Z, Bian R, et al. Alterations of Elastic Property of Spastic Muscle With Its Joint Resistance Evaluated From Shear Wave Elastography and Biomechanical Model. *Front Neurol*. 2019;10:736. Published 2019 Jul 10. doi:10.3389/fneur.2019.00736
16. Gao J, He W, Du LJ, et al. Quantitative Ultrasound Imaging to Assess the Biceps Brachii Muscle in Chronic Post-Stroke Spasticity: Preliminary Observation. *Ultrasound Med Biol*. 2018;44(9):1931-1940. doi:10.1016/j.ultrasmedbio.2017.12.012
17. Lee SSM, Jakubowski KL, Spear SC, Rymer WZ. Muscle material properties in passive and active stroke-impaired muscle. *J Biomech*. 2019;83:197-204. doi:10.1016/j.jbiomech.2018.11.043
18. Analan PD, Ozdemir H (2020) Assessment of post-stroke biceps brachialis muscle stiffness by shear-wave elastography: a pilot study. *Muscle Ligaments Tendons J* 10:531.
19. Aşkın A, Kalaycı ÖT, Bayram KB, et al. Strain sonoelastographic evaluation of biceps muscle intrinsic stiffness after botulinum toxin-A injection. *Top Stroke Rehabil*. 2017;24(1):12-17. doi:10.1080/10749357.2016.1183865
20. Cosgrove D, Piscaglia F, Bamber J, et al. EFSUMB guidelines and recommendations on the clinical use of ultrasound elastography. Part 2: Clinical applications. *Ultraschall Med*. 2013;34(3):238-253. doi:10.1055/s-0033-1335375
21. Vo MH, Lin CJ, Chieh HF, et al. Behavior of medial gastrocnemius muscle beneath kinesio taping during isometric contraction and badminton lunge performance after fatigue induction. *Sci Rep*. 2023;13(1):1779. Published 2023 Jan 31. doi:10.1038/s41598-023-28818-3
22. Xu GX, Chen PY, Jiang X, Huang CC. Visualization of Human Skeletal Muscle Mechanical Anisotropy by Using Dual-Direction Shear Wave Imaging. *IEEE Trans Biomed Eng*. 2022;69(9):2745-2754. doi:10.1109/TBME.2022.3152896
23. Giambini H, An KN. Ultrasound Elastography for Hand Soft Tissue Assessment. *Hand Clin*. 2022;38(1):119-128. doi:10.1016/j.hcl.2021.08.013
24. Vuorenmaa AS, Siitama EMK, Mäkelä KS. Inter-operator and inter-device reproducibility of shear wave elastography in healthy muscle tissues. *J Appl Clin Med Phys*. 2022;23(9):e13717. doi:10.1002/acm2.13717
25. Romer C, Czupajllo J, Zessin E, Fischer T, Wolfarth B, Lerchbaumer MH. Stiffness of Muscles and Tendons of the Lower Limb of Professional and Semiprofessional Athletes Using Shear Wave Elastography. *J Ultrasound Med*. 2022;41(12):3061-3068. doi:10.1002/jum.16062
26. Lall PS, Alsubiheen AM, Aldaihan MM, Lee H. Differences in Medial and Lateral Gastrocnemius Stiffness after Exercise-Induced Muscle Fatigue. *Int J Environ Res Public Health*. 2022;19(21):13891. Published 2022 Oct 26. doi:10.3390/ijerph192113891.

### Assessment of the Influence of Cell Technologies on Denervation-Reinnervation Processes in Muscles after Gunshot Injury Using Shear Wave Elastography (SWE)

*Dolboplov O.V.<sup>1</sup>, Zinchenko V.V.<sup>1</sup>, Yarova M.L.<sup>1</sup>, Siforov D.V.<sup>1</sup>, Haiko O. G.<sup>2</sup>, Klymbuk L.I.<sup>2</sup>, Luchko R.V.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*SI «Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMS of Ukraine», Kyiv, Department of severe skeletal trauma*

<sup>2</sup>*SI «Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMS of Ukraine», Kyiv, Diagnostic department*

**Summary. Objective.** *The purpose of this article is to determine the feasibility of using shear-wave elastography (SWE) in assessing the influence of cell technologies on denervation-reinnervation processes in the muscles of gunshot injury. Material*

**and Methods.** *Ultrasound examination and elastography were performed on a GE Healthcare LOGIQ P9 device with a 5-12 MHz multi-frequency probe. 19 injured males aged 35-57 (average age  $45.31 \pm 0.95$  years) with denervation-reinnervation processes in muscles due to gunshot damage were examined. The examination was performed on the affected limb and on the contralateral healthy limb. Statistical processing was performed using Microsoft Excel and StatSoft Inc. STATISTICA. **Results:** 11 patients with lesions of the radial nerve on the upper limb and 8 people of the peroneal nerve on the lower leg were included in the study. With lesions of the radial nerve, we examined *m. extensor digitorum* on the forearm. For lesions of the peroneal nerve, *m. tibialis anterior* of the lower leg was chosen. After the examination, all patients underwent the procedure of injecting BMAC (Bone Marrow Aspirate Concentrate) into the target muscle. Control studies of shear wave elastography were performed again one month after the procedure. The obtained statistical data on the state of muscle stiffness in dynamics allow us to conclude about the reliably positive outcome of the treatment. **Conclusions.** Ultrasound of muscles with shear wave elastography is a reliable and innovative method of obtaining information about the state of muscle stiffness when assessing the influence of cellular technologies on denervation-reinnervation processes in patients after gunshot injuries.*

**Key words:** *ultrasonography; shear-wave elastography (SWE); cellular technologies; denervation-reinnervation processes; gunshot injury; muscle stiffness.*