

МІНІСТЕРСТВО ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ МЕДИЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ  
О.О. БОГОМОЛЬЦЯ

Кваліфікаційна наукова праця  
на правах рукопису

**ЧЕШУК ЄВГЕНІЙ ВАЛЕРІЙОВИЧ**

УДК 616.832-001-036.8-089:615.84

ДИСЕРТАЦІЯ

**ХІРУРГІЧНЕ ЛІКУВАННЯ НАСЛІДКІВ ПОШКОДЖЕННЯ  
СПИННОГО МОЗКУ МЕТОДИКОЮ ЕПІДУРАЛЬНОЇ  
ЕЛЕКТРОСТИМУЛЯЦІЇ**

222 – Медицина

22 – Охорона здоров'я

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів має посилання на відповідне джерело

Є.В. Чешук

Науковий керівник:

**Цимбалюк Віталій Іванович**, д-р мед наук,  
професор, академік НАН та НАМН України

**Київ – 2024**

Онлайн сервіс створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

ПРОТОКОЛ створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 10:55:58 25.04.2024

Назва файлу з підписом: чешук\_дисс.pdf.asice

Розмір файлу з підписом: 1.5 МБ

Назва файлу без підпису: чешук\_дисс.pdf.zip

Розмір файлу без підпису: 1.5 МБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: ЧЕШУК ЄВГЕН ВАЛЕРІЙОВИЧ

П.І.Б.: ЧЕШУК ЄВГЕН ВАЛЕРІЙОВИЧ

Країна: Україна

РНОКПІ: 3325617877

Організація (установа): ФІЗИЧНА ОСОБА

Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 10:54:32

25.04.2024

Сертифікат виданий: КНЕДП АЦСК АТ КБ "ПРИВАТБАНК"

Серійний номер: 5E984D526F82F38F04000007A095F0134C80C05

Тип носія особистого ключа: Незахищений

Алгоритм підпису: ДСТУ 4105

Тип підпису: Удосконалений

Тип контейнера: Підпис та дані в архіві (розширений) (ASIC-E)

Формат підпису: З повними даними для перевірки (XADES-B-LT)

Сертифікат: Кваліфікований

Підписані файли: чешук\_дисс.pdf

Версія від: 2024.03.27 13:00

## АНОТАЦІЯ

*Чешук Є.В.* Хірургічне лікування наслідків пошкодження спинного мозку методикою епідуральної електростимуляції. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 22 «Охорона здоров'я» зі спеціальності 222 «Медицина» (Нейрохірургія) — Національний медичний університет імені О.О. Богомольця Міністерства охорони здоров'я України, Київ, 2024.

Одним із основних наслідків ушкоджень спинного мозку (УСМ) є втрата неврологічних функцій, відновлення яких є насправді великою проблемою. Частота УСМ постійно зростає через інтенсифікацію промислового розвитку, зростання дорожньо-транспортних пригод та військових конфліктів [1,2]. Лікування хворих з УСМ передбачає виконання декомпресивно-стабілізуючих операцій та методики відновного лікування.

Травми хребта відносяться до найбільш складної діагностичної категорії і складають від 3% до 6 % від всіх пошкоджень скелетно-опорного апарату [55]. Питання ушкоджень спинного мозку, внаслідок травми та її наслідків сьогодні є гостро актуальною проблемою в світі, а в Україні - особливо. В світі щорічно зазнають травми спинного мозку (ТСМ) до 750 тисяч осіб, в США – 18 тисяч і в Україні від 2 до 3 тисяч осіб, і приблизно 1 300 000 людей живуть із неврологічним дефіцитом, пов'язаним зі наслідками ТСМ [55-60]. Переважно це чоловіки, частіше молодші люди внаслідок дорожньо-транспортних подій, мінно-вибухових травм та інших за механізмом травм [61-68].

Під час УСМ виникають первинні і вторинні процеси, які приводять до наслідків травми [3], спочатку виникає механічне пошкодження і судинні ушкодження з наслідками геморагії. В подальшому травма приводить до гіпоксії мозку, електролітних порушень та втрати мембранного потенціалу.

Епідуральна стимуляція створює електричні поля, що локалізуються в ділянці дорсальної поверхні спинного мозку за допомогою електродів, імплантованих на тильну частину твердої оболони, як правило, через циліндричні лінійні багатоконтактні електроди, імплантовані черезшкірно, або багатоколонкові масиви пластин, імплантовані за допомогою ламіномії. Кожен контакт забезпечує індивідуально програмовану провідну поверхню, що призводить до гнучких комбінацій моно-, бі- або мультиполярної стимуляції. Вивідні дроти тунелюються до віддаленого підшкірного імплантованого генератора імпульсів, який можна модулювати електронно і часто перезаряджається.

Вперше показано більшу ефективність встановлення двох систем для епідуральної електростимуляції (ЕЕС) на шийне та попереково-крижове спинномозкове потовщення пацієнтам з ушкодженням шийних сегментів спинного мозку, одночасно з хірургічним лікуванням наслідків (декомпресія, стабілізація) або у відтермінованому періоді. При за давнених травмах та повторних хірургічних утручаннях ефективним є проведення мієлорадикулोलізу та встановлення системи для ЕЕС в місці травми.

В представленому дисертаційному дослідженні за розробленим дизайном було дві групи: дослідна та група порівняння, всього 96 пацієнтів в співвідношенні 2:1 (65:31). В обох групах було хірургічне лікування, яке було необхідним для проведення декомпресії спинного мозку та фіксації хребта, але в дослідній групі лікування було доповнено ще встановленням систем для епідуральної електростимуляції для подальшого проведення сеансів ЕЕС. За останніми міжнародними рекомендаціями хірургічне лікування травми спинного мозку рекомендують проводити до 24 годин після моменту ушкодження його і тоді результат може бути настільки задовільним, що наслідки ушкодження будуть мінімальними і необхідності в проведенні ЕЕС не буде. Але в нашому дослідженні таких пацієнтів не було і тому наслідки УСМ покращувались після хірургічного лікування але в результаті тривалої гіпоксії, компресії нервових структур відновлення було не повним а часто незначним. В групі де додатково застосовували ЕЕС до класичного

хірургічного лікування результати бели суттєво кращими, що говорить про ефективність такої методики. Ми ще не фіксували системно такий симптом, як покращання еректильної функції у чоловіків, але вона практично у всіх мала тенденцію до відновлення разом із відновленням функціонального стану сечового міхура. Отже, розроблена ефективна і безпечна методика встановлення однієї або двох систем електродів для ЕЕС у пацієнтів з наслідками УСМ. Метод епідуральної електростимуляції спинного мозку в комплексному лікуванні УСМ дозволяє відновити функціональні порушення сечового міхура в 22,6 % випадків порівнянні з лише хірургічним лікуванням ( $p < 0,05$ ). Ця методика епідуральної електростимуляції спинного мозку в комплексному лікуванні УСМ дозволяє суттєво зменшувати больовий синдром ( $p < 0,0001$ ), результати в 1.89 рази є кращими ніж у контрольній групі, дозволяє зменшувати статистично значимо спастичність ( $p < 0,0001$ ), вона була 2,11 разів меншою ніж в групі порівняння.

Застосування епідуральної електростимуляції спинного мозку в комплексному лікуванні УСМ дозволяє в 3,6 рази покращити відновлення втрачених моторних функцій ( $p < 0,0001$ ), та зменшувати сенсорний дефіцит ( $p = 0,0007$ ) в порівнянні з контрольною групою.

Перевагою методу є ще те, що його можна застосовувати і в значно пізніші строки (в нашому дослідженні 8 років після травми і попереднього хірургічного лікування: декомпресія і транспедикулярна фіксація) і стимулювати процеси відновлення нервових функцій резерви яких довго можуть зберігатись. Показами до електростимуляції спинного мозку можуть бути нейропатичні болі після травматичних ушкоджень спинного мозку, синдром оперованого хребта (ятрогенні пошкодження).

Вперше показано ефективність і безпечність проведення ЕЕС на першому етапі чи у відтермінованому після хірургічного лікування травми в комплексному лікуванні наслідків УСМ.

Встановлено що ЕЕС сприяє частковому відновленню сенсорної та моторної функції ушкоджених сегментів спинного мозку, зменшенню

більшового синдрому та проявів спастичності, а також порушень функції сечового міхура (зменшення затримки сечі та залишкового об'єма сечі).

**Ключові слова:** травма спинного мозку, ушкодження спинного мозку, епідуральна електростимуляція, відновлення сенсорних та моторних функцій спинного мозку, транспедикулярна фіксація, корпектомія.

## SUMMARY

Cheshuk E.V. Surgical treatment of the consequences of damage to the spinal cord using the technique of epidural electrical stimulation. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge 22 "Health Care" with the specialty 222 "Medicine" (Neurosurgery) - State University "Institute of Neurosurgery named after Academician A.P. Romodanov" National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2024.

One of the main consequences of spinal cord injuries (SCI) is the loss of neurological functions, the recovery of which is actually a big problem. The frequency of SCI is constantly increasing due to the intensification of industrial development, the growth of traffic accidents and military conflicts [1,2]. Treatment of patients with SCI involves performing decompressive-stabilizing operations and methods of restorative treatment.

Spine injuries belong to the most difficult diagnostic category and make up from 3% to 6% of all injuries of the musculoskeletal system [55]. The issue of spinal cord injuries as a result of trauma and its consequences is an acutely relevant problem in the world today, and especially in Ukraine. In the world, up to 750,000 people suffer spinal cord injury annually, in the USA – 18,000 and in Ukraine from 2 to 3,000 people, and approximately 1,300,000 people live with neurological deficits associated with the consequences of SCI [55-60]. These are mostly men, more often younger people as a result of traffic accidents, mine-explosive injuries and other injury mechanisms [61-68].

During SCI, primary and secondary processes occur, which lead to the consequences of trauma, initially there is mechanical damage and vascular damage with the consequences of hemorrhage. In the future, the injury leads to hypoxia of the brain, electrolyte disturbances and loss of membrane potential. Epidural

stimulation creates electrical fields localized to the dorsal surface of the spinal cord using electrodes implanted on the back of the dura mater, usually via cylindrical linear multicontact electrodes implanted percutaneously or multicolumn arrays of plates implanted via laminotomy. Each contact provides an individually programmable conductive surface, resulting in flexible combinations of mono-, bi- or multipolar stimulation. Lead wires are tunneled to a remote, subcutaneously implanted pulse generator that can be modulated electronically and recharged frequently.

For the first time, the greater efficiency of installing two systems for EES on cervical and lumbar spinal cord thickening in patients with damage to the cervical segments of the spinal cord, simultaneously with surgical treatment of the consequences (decompression, stabilization) or in a delayed period, has been shown. In case of long-standing injuries and repeated surgical interventions, it is effective to perform myelorradiculolysis and install a system for EES at the site of the injury.

In the dissertation study "Surgical treatment of the consequences of spinal cord damage using the epidural stimulation method" according to the developed design, there were two groups: an experimental and a comparison group, a total of 96 patients in a ratio of 2:1 (65:31). Both groups had surgical treatment, which was necessary for decompression of the spinal cord and fixation of the spine, but in the main group, the treatment was supplemented by the installation of systems for epidural electrical stimulation for further EES sessions. According to the latest international recommendations, surgical treatment of a spinal cord injury is recommended to be carried out up to 24 hours after the moment of its damage, and then the result can be so satisfactory that the consequences of the damage will be minimal and there will be no need to conduct EES. But in our study, there were no such patients, and therefore the effects of SCI improved after surgical treatment, but as a result of prolonged hypoxia, compression of nerve structures, recovery was not complete and often insignificant. In the group where EES was additionally applied to classical surgical treatment, the results were significantly better, which indicates the effectiveness of such a technique. We have not yet systematically recorded such

a symptom as the improvement of erectile function in men, but it tends to recover in almost all of them together with the recovery of the functional state of the urinary bladder. Therefore, an effective and safe method of installing one or two electrode systems for EES in patients with the consequences of USM has been developed. The method of epidural electrical stimulation of the spinal cord in the complex treatment of SCI allows to restore functional disorders of the urinary bladder in 22.6% of cases compared to only surgical treatment ( $p < 0.05$ ). This method of epidural electrical stimulation of the spinal cord in the complex treatment of SCI allows to significantly reduce the pain syndrome ( $p < 0.0001$ ), the results are 1.89 times better than the control group, allows to reduce statistically significant spasticity ( $p < 0.0001$ ), it was 2, 11 times less than in the comparison group.

The most significant use of epidural electrical stimulation of the spinal cord in the complex treatment of SCI allows for a 3.6-fold improvement in restoring lost motor functions ( $p < 0.0001$ ), and reduce sensory deficits ( $p = 0,0007$ ) compared to the control group.

Another advantage of the method is that it can be used at much later times (in our study, 8 years after the injury and previous surgical treatment: decompression and transpedicular fixation) and stimulate the processes of restoring nerve functions, the reserves of which can be preserved for a long time. Indications for electrostimulation of the spinal cord can be neuropathic pain after traumatic injuries of the spinal cord, syndrome of the operated spine (iatrogenic damage).

For the first time, the effectiveness and safety of conducting EES at the first stage or delayed after surgical treatment of trauma in the complex treatment of the consequences of SCI has been shown.

It has been established that EES contributes to the partial restoration of sensory and motor function of damaged segments of the spinal cord, reduction of pain syndrome and manifestations of spasticity, as well as disorders of bladder function (reduction of urinary retention and residual urine volume).

**Key words:** spinal cord injury, spinal cord damage, epidural electrical stimulation, restoration of sensory and motor functions of the spinal cord.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Nekhlopochny, O. S., Verbov, V. V., Cheshuk, I. V., & Vorodi, M. V. (2021). Surgical management of traumatic irreducible spondyloptosis of thoracolumbar junction. *Ukrainian Neurosurgical Journal*, 27(2), 56–64. <https://doi.org/10.25305/unj.228926>

(Особистий внесок здобувача полягає у визначенні дизайну дослідження, участі у проведенні оперативних втручань, вилученні матеріалу для патоморфологічного дослідження, узагальненні результатів, редагуванні тексту)

2. Nekhlopochny, O., Verbov, V., Tsymbaliuk, I., Vorodi, M., & Cheshuk, I. (2021). Neuropathic pain as a predictor of neurological disorders regression in patients with spinal cord traumatic injury. *PAIN, JOINTS, SPINE*, 11(3), 110–117. <https://doi.org/10.22141/2224-1507.11.3.2021.243047>

(Особистий внесок здобувача полягає у вивченні та узагальненні літературних даних за проблемою, отриманні результатів дослідження, їх узагальненні та інтерпретації, формуванні ілюстративного матеріалу, редагуванні тексту)

3. Nekhlopochny, O., Vorodi, M., & Cheshuk, I. (2022). AOSpine Thoracolumbar Spine Injury Classification System in determining the treating tactics of thoracolumbar junction traumatic injuries (literature review). *TRAUMA*, 23(2), 68–78. <https://doi.org/10.22141/1608-1706.2.23.2022.893>

4. Nekhlopochny, O., Cheshuk, Y., Vorodi, M., Tsymbaliuk, Y., Karpinskyi, M., & Yaresko, O. (2022). Biomechanical State of the Operated Thoracolumbar Junction in Lateroflexion. *TERRA ORTHOPAEDICA*, (2(113), 58-67. <https://doi.org/10.37647/0132-2486-2022-113-2-58-67>

5. Nekhlopochny, O., & Cheshuk, Y. (2022). Traumatic injuries of the thoracolumbar junction. Classification by Friedrich P. Magerl et al. *TRAUMA*, 23(3), 4–22. <https://doi.org/10.22141/1608-1706.3.23.2022.895>

6. Nekhlopochny, O. S., Verbov, V. V., Cheshuk, I. V., Vorodi, M. V., Karpinsky, M. Y., & Yaresko, O. V. (2023). The biomechanical state of the thoracolumbar junction with various options of transpedicular fixation under flexion load. *Ukrainian Neurosurgical Journal*, 29(2), 49–56. <https://doi.org/10.25305/unj.277152>
7. Nekhlopochny, O., Verbov, V., Cheshuk, I., Karpinsky, M., & Yaresko, O. (2023). Mathematical modeling of variants of transpedicular fixation at the thoracolumbar junction after Th12 vertebrectomy during trunk backward bending. *Orthopedical traumatology and prosthetics*, (2), 43–49. <https://doi.org/10.15674/0030-59872023243-49>
8. Komarov, M. P., Nekhlopochny, O. S., Verbov, V. V., Chernenko, O. H., Shmelova, A. A., Cheshuk, I. V., & Malysheva, T. A. (2023). Chondroblastoma of the cervical-thoracic junction: global data and own experience. *Ukrainian Neurosurgical Journal*, 29(3), 66–76. <https://doi.org/10.25305/unj.277910>
9. Nekhlopochny, O. S., Verbov, V. V., Cheshuk, I. V., & Vorodi, M. V. (2023). Assessment of risk factors for the vertebral body kyphotic deformity progression in patients with type A1 injuries of the thoracolumbar junction. *Ukrainian Neurosurgical Journal*, 29(3), 26–33. <https://doi.org/10.25305/unj.278927>
10. Nekhlopochny, O., Verbov, V., Cheshuk, I., & Vorodi, M. (2023). The value of the posterior ligamentous complex in traumatic injury of thoracolumbar junction. Part 1. Morphology and biomechanics. *TRAUMA*, 24(3), 12–20. <https://doi.org/10.22141/1608-1706.3.24.2023.950>

#### **Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

1. Tsymbaliuk IV, Nekhlopochny OS, Cheshuk IV. The effectiveness of NeySi 3M long-term Epidural Electrical Stimulation in patients with CRPS type 1. 16<sup>th</sup> World Congress on Spine & Orthopedics; September 21-22; London: Pulsus; 2022. P. 107.

2. Nekhlopochyn O, Verbov V, Tsymbaliuk I, Vorodi M, Cheshuk I. Some characteristics of pain in patients with chronic spinal cord injury. Global Spine Congress 2023; May 31 — June 3; Prague: Global Spine Journal; 2023;13(2S). P. 538S-539S.
3. Nekhlopochyn O, Verbov V, Tsymbaliuk I, Vorodi M, Cheshuk I. Quality of life in patients with mild spinal cord injury after anterior subaxial cervical decompression-fusion surgery: one-year follow-up. Global Spine Congress 2023; May 31 — June 3; Prague: Global Spine Journal; 2023;13(2S). P. 504S-505S
4. Nekhlopochyn O, Tsymbaliuk I, Verbov V, Cheshuk I, Vorodi M. Correlation of neuropathic pain intensity and neurological recovery in patients with spinal cord traumatic injury. Global Spine Congress 2023; May 31 — June 3; Prague: Global Spine Journal; 2023;13(2S). P. 537S.
5. Nekhlopochyn O, Tsymbaliuk I, Verbov V, Vorodi M, Cheshuk I. Severity and type of traumatic subaxial cervical injury in prediction of neurological deficit. Global Spine Congress 2023; May 31 — June 3; Prague: Global Spine Journal; 2023;13(2S). P. 507S-508S.
6. Nekhlopochin O, Verbov V, Cheshuk I, Vorodi M. Determining decision-making classification of traumatic thoracolumbar junction injuries. 18th World Congress of Neurosurgery; 4-8 Dec 2023; Cape Town, South Africa 2023. P. 259.

## ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень.....	14
Вступ.....	15
<b>РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ.....</b>	<b>20</b>
<b>1.1. Процеси відновлення ушкодження спинного мозку.....</b>	<b>20</b>
<b>1.2. Хірургічні методики для відновлення провідності ушкодженого спинного мозку.....</b>	<b>23</b>
<b>1.3. Відновлення іннервації спинного мозку шляхом формування обхідних нервових анастомозів.....</b>	<b>26</b>
<b>1.4. Лікування ускладнень травми спинного мозку із застосуванням методу епідуральної електричної стимуляції: можливості, покази, перспективи .....</b>	<b>27</b>
<b>Розділ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ .....</b>	<b>41</b>
<b>2.1. Клінічна характеристика пацієнтів в досліджуваних групах .....</b>	<b>41</b>
<b>2.2. Клініко-неврологічні методи дослідження хворих.....</b>	<b>47</b>
<b>2.3. Методика проведення епідуральної електростимуляції спинного мозку.....</b>	<b>49</b>
<b>2.4. Статистична обробка даних.....</b>	<b>55</b>
<b>Розділ 3. Аналіз результатів хірургічного лікування ускладнень травми спинного мозку в групі порівняння.....</b>	<b>57</b>
<b>Розділ 4. Аналіз результатів хірургічного лікування ускладнень травми спинного мозку в дослідній групі (з застосуванням ЕЕС).....</b>	<b>62</b>
<b>Розділ 5. Порівняння результатів хірургічного лікування ускладнень травми спинного мозку в дослідній групі та групі порівняння.....</b>	<b>74</b>
<b>Розділ 6. Розвиток ускладнень після застосування ЕЕС.....</b>	<b>93</b>
<b>Розділ 7. Обговорення результатів.....</b>	<b>100</b>
<b>Висновки.....</b>	<b>104</b>
<b>Практичні рекомендації.....</b>	<b>105</b>

<b>Список використаних джерел.....</b>	<b>107</b>
<b>Додатки.....</b>	<b>124</b>

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВМП – викликані м’язові потенціали  
ГЦІ – генератори центральних імпульсів  
ДТП – дорожньо-транспортна пригода  
ЕНМГ – електронейроміографія  
ЕЕС – епідуральна електростимуляція  
МРТ – магнітно-резонансна томографія  
НБС – невропатичний больовий синдром  
ПД – потенціал дії  
СКТ – спіральна комп’ютерна томографія  
ТСМ – травма спинного мозку  
УСМ – ушкодження спинного мозку  
ЦНС – центральна нервова система  
ЧЦП – час центрального проведення  
NPRS – Numeric Pain Rating Scale  
NRS — Numerical Rating Scale  
ASIA – American Spinal Injury Association

## ВСТУП

Найбільш складними травмами опорного-рухового апарату є ушкодження хребта. Вони складають від 3% до 6 % від всіх пошкоджень, проте їх кількість зростає в останній час, що викликано війною в Україні, яку розв'язала проти неї росія. Ушкодження спинного мозку, які виникають внаслідок травми, мають тяжкі наслідки, часто приводять до повної інвалідизації, завжди були, а сьогодні особливо є гострою і актуальною проблемою в Україні, та й в світі. Світові показники говорять про щорічне травмування спинного мозку у майже 750 тисяч осіб, в США – 18 тисяч і в Україні від 2 до 3 тисяч осіб, і приблизно 1 300 000 людей живуть із неврологічним дефіцитом, пов'язаним зі наслідками ТСМ [55-60], це тяжкі інваліди, що потребують догляду. Переважно це чоловіки, частіше молодші люди внаслідок дорожньо-транспортних подій, мінно-вибухових травм та інших за механізмом травм [61-68].

Травма приводить до гіпоксії мозку, електролітних порушень та втрати мембранного потенціалу. На цьому фоні епідуральна стимуляція створює електричні поля, що локалізуються в ділянці дорсальної поверхні спинного мозку за допомогою електродів, імплантованих на тильну частину твердої оболони, як правило, через циліндричні лінійні багатоконтактні електроди, імплантовані черезшкірно, або багатоколонкові масиви пластин, імплантовані за допомогою ламінектомії. Кожен контакт забезпечує індивідуально програмовану провідну поверхню, що призводить до гнучких комбінацій моно-, бі- або мультиполярної стимуляції.

Цей фізіологічний, в своїй основі, напрямок реабілітації хворих з УСМ використовується останні 50 років, але залишається багато питань не вивченими та можливостей не в повній мірі використаних, що є причиною великої кількості досліджень в цьому напрямку.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**  
Дисертаційна робота є фрагментом наукових досліджень Національного

медичного університету імені О.О. Богомольця (надалі — НМУ) та складовою частиною науково-дослідних тем кафедри. Первинні дані отримано і опрацьовано під час виконання двох ініціативно-пошукових робіт кафедри нейрохірургії НМУ — *«Дослідити особливості розвитку синдрому спастичності при травмі спинного мозку в умовах застосування відновних нейроінженерних втручань»* (2015–2017 рр., № держ. реєстр.: 0115U000013) і *«Дослідити ефективність новітніх біоінженерних засобів відновлення цілісності периферичного нерва і спинного мозку при їхньому лацераційному ушкодженні»* (2021–2023 рр., № держ. реєстр.: 0121U108052).

**Мета дослідження:** підвищити ефективність хірургічного лікування хворих з ушкодженням спинного мозку, шляхом використання методики епідуральної електростимуляції.

**Завдання дослідження:**

1. Оптимізувати методику хронічної епідуральної електростимуляції спинного мозку на тлі хребетно-спинномозкової травми та удосконалити діагностичний алгоритм для визначення показань для її застосування.
2. Вивчити ранні та віддалені результати лікування хребетно-спинномозкової травми з використанням оптимізованої методики епідуральної електростимуляції у пацієнтів з перенесеною хребетно-спинномозковою травмою.
3. Провести комплексний порівняльний аналіз результатів хірургічного лікування хребетно-спинномозкової травми з використанням оптимізованої методики епідуральної електростимуляції та без неї.
4. Провести комплексний порівняльний аналіз результатів хірургічного лікування хребетно-спинномозкової травми з використанням епідуральної електростимуляції спинного мозку на одному та двох рівнях.
5. Проаналізувати ускладнення при застосуванні оптимізованої методики хронічної епідуральної електростимуляції спинного мозку на тлі хребетно-спинномозкової травми.

6. На основі проведеного комплексного порівняльного аналізу запропонувати вдосконалений алгоритм лікування хребетно-спинномозкової травми із застосуванням хронічної епідуральної електростимуляції спинного мозку.

**Об'єкт дослідження:** хребетно-спинномозкова травма.

**Предмет дослідження:** кількісні та якісні дані, отримані під час клінічних, клініко-неврологічних, нейровізуалізаційних і електрофізіологічних досліджень у пацієнтів сформованих клінічних груп.

**Методи дослідження:**

1. Загальноклінічний – встановлення діагнозу парез та параліч м'язів верхніх та нижніх кінцівок, контроль функцій органів тазу.
2. Клініко-неврологічний — об'єктивізація ступеня ушкодження спинного мозку з використанням загальноприйнятих шкал.
3. Електрофізіологічний — доопераційна електродіагностика, інтраопераційна електродіагностика, контроль в динаміці за допомогою інструментальних електрофізіологічних методів дослідження.
4. Нейровізуалізуючі методи дослідження — КТ, МРТ, спондилографія.
5. Математико-статистичний — оцінка достовірності відмінності показників у різних групах, однофакторний аналіз та метод побудови багатофакторних моделей логістичної регресії для виявлення зв'язків між показниками.

**Наукова новизна одержаних результатів.**

У роботі запропоновано нову методику епідуральної електростимуляції спинного мозку на тлі хребетно-спинномозкової травми. Вперше показано більшу ефективність встановлення двох систем для ЕЕС на шийне та поперекове потовщення спинного мозку пацієнтам з ушкодженням шийних сегментів спинного мозку, одномоментно з хірургічним лікуванням наслідків (декомпресія, стабілізація) або у відтермінованому періоді. При за давнених травмах та повторних хірургічних утручаннях ефективним є проведення мієлорадикулोलізу та встановлення системи для ЕЕС в місці травми.

Вперше показано ефективність і безпечність проведення ЕЕС на першому етапі чи у відтермінованому (до 8 років) після хірургічного лікування травми в комплексному лікуванні наслідків УСМ.

Встановлено що ЕЕС сприяє частковому відновленню сенсорної та моторної функції ушкоджених сегментів спинного мозку, зменшенню больового синдрому та проявів спастичності, а також порушень функції сечового міхура (зменшення затримки сечі та залишкового об'єма сечі).

**Практичне значення одержаних результатів.** Розроблено алгоритм та практичні рекомендації застосування ЕЕС в комплексному хірургічному лікуванні ушкоджень спинного мозку, отримані результати дослідження впроваджено в навчальний процес на кафедрі нейрохірургії НМУ. Розроблено методика встановлення системи для ЕЕС, яка є безпечною і ефективною. Методика ЕЕС дозволяє більш ефективно проводити реабілітаційні заходи у пацієнтів з наслідками ушкодження спинного мозку.

**Особистий внесок аспіранта.** Самостійно проведено патентно-інформаційний пошук та аналіз літературних джерел за темою дисертаційної роботи, аналіз результатів клінічних та інструментальних методів дослідження хворих з ушкодженнями спинного мозку, збір та обробка первинних даних, ведення бази даних, лабораторних, інструментальних методів обстеження, результатів лікування, статистична обробка, аналіз та узагальнення отриманих результатів. Значна частина пацієнтів досліджуваної та контрольної групи була прооперована аспірантом, або він приймав участь в операції як асистент і був лікуючим лікарем цих пацієнтів. Брав безпосередню участь в зборі даних, створенні бази даних, в написанні статей та тез доповідей за матеріалами дисертації.

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на наступних заходах: на засіданнях кафедри нейрохірургії НМУ імені О.О. Богомольця (Київ, 2019-2023), фрагменти роботи доповідались на конференціях молодих вчених ДУ

"Інститут нейрохірургії ім. акад. А.П.Ромоданова" НАМН України (2023-2024pp), XVI Міжнародній науково-практичній конференції студентів та молодих вчених "Спеціальні питання та лікування захворювань ЛОР-органів, краніофасіальної ділянки та органа зору" (19 березня 2024 р.), 16th World Congress on Spine & Orthopedics; September 21-22; London: Pulsus; 2022., Global Spine Congress 2023; May 31 — June 3; Prague, 18th World Congress of Neurosurgery; 4-8 Dec 2023; Cape Town, South Africa.

**Обсяг і структура дисертації.** Основний текст дисертації викладено українською мовою на 124 сторінках, містить анотацію, вступ, 7 розділів, висновки, практичні рекомендації, додатки. Робота містить 20 таблиць, 23 рисунки. Список використаних джерел наукової літератури містить 123 найменувань на 15 сторінках.

# РОЗДІЛ 1

## ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

### 1.1. Процеси відновлення ушкодження спинного мозку

Одним із основних наслідків ушкоджень спинного мозку (УСМ) є втрата неврологічних функцій, відновлення яких є насправді великою проблемою. Частота УСМ постійно зростає через інтенсифікацію промислового розвитку, зростання дорожньо-транспортних пригод та військових конфліктів [1,2]. Лікування хворих з УСМ передбачає виконання декомпресивно-стабілізуючих операцій та методики відновного лікування.

Під час УСМ виникають первинні і вторинні процеси, які приводять до наслідків травми [3], спочатку виникає механічне пошкодження і судинні ушкодження з наслідками геморагії. В подальшому травма приводить до гіпоксії мозку, електролітних порушень та втрати мембранного потенціалу.

Окремо слід зазначити про активацію цитолізу під впливом ензиму кальпейн [4] та розвитку аутоімунного запалення [5]. В умовах гіпоксії переважають процеси анаеробного гліколізу, утворюються вазоактивні продукти, розвивається набряк тканин [6]. З часом розвивається вторинна посттравматична ішемія, демієлінізація спинальних провідників, порушення ліквороциркуляції, рубцеве переродження спинного мозку, утворення гідромієлітичних кіст [7]. Значну роль надають при травмі спинного мозку амінокислотам, а саме зростанню глутамату [8]. Для лікування вторинних змін призначають кортикостероїди, ефективність яких доведена експериментальними та клінічними дослідженнями [9]. Метилпреднізолон зменшує набряк спинного мозку, відновлює електролітний баланс.

Важливим чинником травматичного ушкодження спинного мозку є пошкодження мієлінової оболонки аксонів. Травматичне пошкодження мієлінової оболонки є причиною аутоімунного запалення в зоні травми [10,11].

Порушення спинномозкового кровообігу в місці ушкодження обумовлені пошкодженням або компресією спінальних судин, що приводить до некрозу тканини, а з часом в зоні ушкодження формується гліо-волоконистий рубець, який поступово стає сполучнотканинним з множинними мікрокістами, деформацією нервових волокон [12].

В результаті травми в аксонах відбувається демієлінізація дистальніше та проксимальніше місця зони пошкодження (валерівська дегенерація) – явище аксотомії [13]. Після аксональної реакції виникають дистрофічно-дегенеративні зміни в нервовій клітині, викликані порушенням аксонотоксу і трофіки нейрону [14]. Потік речовин в аксоні має двобічний характер і відбувається постійний обмін інформацією між нейронами та аксонами. Відсутність зв'язку з дистальними відрізками аксону веде до дегенеративних змін в нейроні і навпаки коли нервеве волокно відновлюється то нейрон поступово морфологічно і функціонально відновлюється, що може бути в основі лікувальної дії епідуральної електростимуляції (ЕЕС) [15,16]. Аксотомія може виступати індуктором апоптозу нейронів. Фактори росту, які потрібні для відновлення нейрону, запобігають ретроградній загибелі центральних нейронів, стимулюють регенераторні процеси в пошкодженому спинному мозку (колатеральний спраутинг) [17]. Ці фактори мають білкову природу, синтезуються в тілі нейрона і рухаються вздовж аксона [16]. Нейротрофічні фактори мають різну молекулярну масу, є специфічними і стимулюють ріст нейронів в різних відділах нервової системи [18].

Виділяють три етапи регенерації: пошкодження нейронів, регенерація і ріст аксонів та створення синапсів [16,17]. Спраутинг – це регенерація, гіпертрофія неушкоджених нейронів ріст колатеральних аксонів в ділянки іннервації пошкодженими аксонами. Отже для переживання має значення відстань між місцем травми і тілом пошкодженого аксона та наявність

факторів росту, які індукують їх спраутинг. В регенерації приймають участь різні клітинні елементи, до яких входять - епендімальні та шванівські клітини, гліальні клітини, аксони та кровоносні судини [17].

Є ряд причин, які перешкоджають регенерації нервових волокон при травмі спинного мозку: дією хімічних факторів, формуванням неповноцінних синапсів на проксимальній куксі, відсутність в ЦНС шванівських клітин і утворення сполучнотканинного рубця [18,20].

В місці травми прийнято виділяти три зони переродження нервової тканини: центральну сполучнотканинну, проміжну гліосполучнотканинну, периферичну гліально-кістозну [20]. Для зупинки блокування росту фіброзної тканини використовують трансплантації ембріональної нервової тканини [21]. Важливою є роль астроцитів у регенерації нервових волокон: вони виділяють біологічні фактори для цього [22,23]. Було показано, що електричні або магнітні поля [24] можуть впорядковувати астроцити і в цьому теж є підґрунтя для використання епідуральної електростимуляції (ЕЕС).

Ще одним фактором, що перешкоджає регенерації аксонів, є мієлін, вироблений олігодендроцитами. У ембріона бідна на мієлін тканина здатна чудово регенерувати [25]. Мієлін від шванівських клітин посилює регенерацію аксонів. Проліферація епендімальних клітин або стовбурових клітин, що мають субепендімальне походження [26] дозволяє створити матрикс для регенерації.

Регенерація аксонів відбувається шляхом видовження їх та колатерального спраутінга (бокові вирости) та утворення синапсів дендритичного типу. Тому еволюційно спинний мозок після його травматичного ушкодження має здатність до регенерації. Додатковим стимулом підсилюючим регенерацію може бути ЕЕС.

## **1.2. Хірургічні методики для відновлення провідності ушкодженого спинного мозку**

Розвиток трансплантології відобразився в застосуванні трансплантації периферичних нервів в місце ушкодженого спинного мозку, але відсутність основи (шванівських клітин) для росту аксонів вимагало пошуків в цьому напрямку рішень і одним із них було використання фрагментів подрібненого сідничного нерва [27,28]. Велика кількість робіт присвячено клітинній трансплантації для відновлення провідності спинного мозку [29] після його травматичного ушкодження. Але сьогодні, застосування ембріональних нервових клітин для трансплантації має юридичні та етичні обмеження. Як варіант, можливе застосування культивованих аутологічних нервових клітин [30].

Застосування макрофагів сприяє очищенню ділянки травми від мієліну, зменшенню туморнекротичного фактору, і синтезу нейропротективних факторів, що позитивно впливає на регенерацію [31]. Ефективним є застосування аутологічних клітин кісткового мозку [32], в якому є багато стовбурових клітин. Клітини кісткового мозку продукують цитокіни, які захищають нейрони і впливають на регенерацію [33].

Для створення матрикса почали використовувати біорезорбтивні матеріали, одним з таких є "Нейрогель" [34]. Матрикс необхідний для формування мережі глікопротеїдів для взаємодії молекул в міжклітинному середовищі. Нейрогель - це метакриламід і має пористу структуру. Через мікропори різного діаметру можуть рости аксони. Відмічено що нейрогель може активувати процеси регенерації при чому сам з часом реабсорбується. Доведено, що нейрогель сприяє регенерації аксонів [35].

Ще одним напрямом відновлення провідності нервових волокон є застосування операцій, що покращують спинномозковий кровообіг. До цих

операцій відносять реваскуляризацію міжреберними та потиличними артеріями, мієлорадикулोलіз, оментомієлопексію. Але результати після цих операцій були незначними [36].

З кінця 80-х років 20-го сторіччя почав розвиватись метод епідуральної електростимуляції спинного мозку [37]. Електричний струм може стимулювати провідність нервових волокон після травми, Має значення сила струму, тривалість стимуляції, локалізація стимуляції, розміщення електродів [38]. Для проведення електростимуляції застосовують хімічно інертні електроди, не викликати запалення навколишніх тканин. Проблемою електростимуляції є формування сполучної тканини навколо електродів, що може послабити вплив на нервову систему та розвиток толерантності до імпульсів [39]. Найбільш часто використовують платинові або платиново-іридієві електроди.

В експерименті було показано, що під дією електричного струму стимулюється спраутінг аксонів, продукуються фактори росту, покращується кровоток. Механізм формування спраутінгу під дією електростимуляції до кінця не розкрито [39,40].

Мембрана нейрону несе позитивний заряд і тоді електрод має негативний заряд, але коли нейрон має негативний заряд він не може поширювати імпульс. Електростимуляція веде до деполяризації клітинної мембрани, що відновлює здатність аксону проводити нервові імпульси [41].

Розміщення електродів має суттєве значення.. Коли катод нижче від аноду активуються провідні шляхи в каудальному напрямку. Електроди розміщують на задньо-боковій поверхні спинного мозку, щоб висхідні провідні шляхи не активувати. Коли катод розмістити вище від аноду активуються провідні шляхи глибокої чутливості, що пригнічує ноціцептивні нервові волокна. Поперечне розміщення електродів дозволяє глибоко впливати на 1-2 сегменти [42]. Для охоплення більшої кількості сегментів потрібно збільшити відстань анодом і катодом.

Регулюючи силу струму можна регулювати знеболюючий ефект, викликаючи різного ступеня парестезію [43,44]. Ефективність електростимуляції визначається провідністю тканин, наприклад ліквор і біла речовина добре проводять, а жир і тверда оболонка гірше.

Під час електростимуляції можливо інгібувати симпатичних аференти для розширення судин. Це використовують для лікування стенокардії та оюлітерууючих захворювань судин нижніх кінцівок.

Застосування епідуральної електростимуляції ґрунтується на впливі на "больові ворота" в задніх рогах спинного мозку. При подразнення аферентних волокон периферійної нервової системи великого діаметру ворота закриваються і так впливають на нейропатичні та симпатичні болі.

Для встановлення електродів виконують лямінектомію для активації пропріочутливих шляхів, де є больові системи спинного мозку. Показами до електростимуляції спинного мозку можуть бути нейропатичні болі після травматичних ушкоджень спинного мозку, вірусні нейропатії, синдром оперованого хребта, больові синдроми при розсіяному склерозі.

Сьогодні день епідуральна електростимуляція спинного мозку широко застосовується для лікування невропатичних больових синдромів та корекції порушення функцій сечового міхура [45], для відновлення рухів в нижніх кінцівках у хворих з паралегією [46 ] корекцію спастичності м'язів нижніх кінцівок та відновлення рухів в верхніх кінцівках у хворих з ушкодженням шийних сегментів спинного мозку [43],

Долідження дії епідуральної електростимуляції на відновлення неврологічних функцій у хворих наслідками травматичного ушкодження спинного мозку є перспективним в складі комплексного лікування хворих.

### **1.3. Відновлення іннервації спинного мозку шляхом формування обхідних нервових анастомозів**

Результати реімплантації нервових волокон плечового сплетення при їх авульсії сприяли розвитку цього напрямку лікуванню ушкоджень спинного мозку. Операції формування обхідних шляхів спинномозкової іннервації можна поділяють на 3 групи: 1 – операції формування мікроанастомозів між міжреберними нервами і поперековими або сакральними корінцями; 2 – операції з імплантації міжреберних нервів в дистальну куксу спинного мозку; 3 – операції імплантації корінців поперекового потовщення в проксимальну куксу спинного мозку.

В експериментальних дослідженнях з формування інтеркостоломбарних анастомозів було доведено можливість регенерації спінальних аксонів через обхідні анастомози у крупних ссавців [46,47], були отримані хороші результати у відновленні рухів в задніх кінцівках. В експерименті на щурах провели хірургічну реконструкцію афрентних та еферентних шляхів, що іннервують сечовий міхур. Електрофізіологічно було доведено зростання внутріміхурового тиску у відповідь на стимуляцію. В дистальних відділах корінців-реципієнтів мав місце колатеральний спаутінг [48].

Можливості мікрохірургії в формуванні обхідних анастомозів спинномозкової іннервації є дуже перспективними [49,50] і це сприяє впровадженню методу лікування в практику нейрохірургічних клінік світу.

Невротизація дистальної кукси спинного мозку міжреберними нервами або корінцями поперекового потовщення дозволяє формувати синапси з мотонейронами передніх рогів спинного мозку, що втратили центральну іннервацію [51] що може бути успішно застосована для часткового відновлення рухів в кінцівках. Але лімітоване відновлення рухів при операціях

формування обхідних анастомозів пов'язано з тим, що периферичні нерви є слабкими невротизаторами.

Операції невротизації одного нерва іншим широко застосовується в лікуванні травматичних ушкоджень і розглядається як перспективний напрямок в невротизації спинного мозку [52,53].

Можливим видом хірургічного лікування хворих з наслідками травматичного ушкодження шийних сегментів спинного мозку є реконструктивні хірургічні втручання на сухожилках [54].

**Підсумок.** Питання відновлення втрачених неврологічних функцій при травматичному ушкодженні спинного мозку частково вирішується. Значний потенціал, недостатньо вивчений, має в собі застосування ЕЕС в комплексі з іншими методами: невроліз, стабілізація хребта і декомпресія зони травми.

#### **1.4. Лікування ускладнень травми спинного мозку із застосуванням методу епідуральної електричної стимуляції: можливості, покази, перспективи**

Сучасні досягнення в галузі нейрохірургії привернули увагу до поглибленого дослідження травм спинного мозку і їх наслідків. Нейрохірурги особливу увагу приділяють дослідженням питань ушкодження спинного мозку та їх наслідків: етіопатогенезу, особливостям діагностики та підходам до лікування. Травма спинного мозку та її наслідки призводить до постійної втрати сенсомоторної та вегетативної функції, і впливає на якість життя, функціональну незалежність, фізичне та психологічне здоров'я, а також соціальну та економічну активність. Незважаючи певні досягнення у розумінні тонких механізмів етіопато- і морфогенезу ТСМ, наслідки лікування залишають бажати кращого і їх все ще важко вважати задовільними. Навіть за умови вчасної і адекватної декомпресії та відновлення ліквороциркуляції на

травмованому рівні спинного мозку, не завжди спостерігаємо відновлення втрачених функцій, що пов'язано з рядом складних компенсаторних і захисних механізмів.

Травми хребта відносяться до найбільш складної діагностичної категорії і складають від 3% до 6 % від всіх пошкоджень скелетно-опорного апарату [55]. Питання ушкоджень спинного мозку, внаслідок травми та її наслідків сьогодні є гостро актуальною проблемою в світі, а в Україні - особливо. В світі щорічно зазнають травми спинного мозку (ТСМ) до 750 тисяч осіб, в США – 18 тисяч і в Україні від 2 до 3 тисяч осіб, і приблизно 1 300 000 людей живуть із неврологічним дефіцитом, пов'язаним зі наслідками ТСМ [55-60]. Переважно це чоловіки, частіше молодші люди внаслідок дорожньо-транспортних подій, мінно-вибухових травм та інших за механізмом травм [61-68].

Для комплексної діагностики найбільш ефективною є магнітно-резонансна томографія (МРТ) хребта. МРТ показана не у всіх випадках травми хребта, вона дає більш детальну інформацію про структури м'яких тканин, включаючи міжхребцеві диски, зв'язки, епідуральний простір, судини та спинний мозок. Інформацію про ці структури, яка була отримана при магнітно-резонансному дослідженні важко отримати іншими діагностичними методами, тому МРТ дослідження вважається золотим стандартом в оцінці важкості ушкодження спинного мозку.

Раніше ушкодження спинного мозку несло за собою пожиттєво супутню втрату фізичної активності, що приковувала пацієнта до інвалідного візка. Лікувальний арсенал корекції даної патології був обмежений, а його результати залишали бажати кращого. Ступінь важкості ТСМ найчастіше стратифікується за шкалою порушення Американської асоціації травм хребта (ASIA): тобто моторна та сенсорна повна (AIS-A), моторна повна сенсорна неповна (AIS-B) та градації моторної неповної (AIS-C) до AIS-E). Майже половина ТСМ призводить до повного сенсомоторного паралічу, де значне відновлення відбувається рідко [68–70]. Відновлення неврологічної функції

має першочергове значення, і мета-аналіз численних когортних ретроспективних досліджень визначив послідовні пріоритети нейровідновлення [71-78]. Сечовий міхур, кишківник і статева функція вважають пріоритетними в оцінці відновлення функції спинного мозку [79-81]. З огляду оцінки повноти відновлення рухової функції, люди з нижньою параплегією визначили відновлення пересування, як найважливіший пріоритет, потім стояння [82], тоді як люди з тетраплегією віддавали пріоритет відновленню функції кисті/руки перед функцією нижніх кінцівок [83].

Отже, для об'єктивізації та оцінки перспектив і планування стратегії відновлення наслідків ТСМ доцільні комплексні дослідження, які спрямовані на обґрунтування диференційованого вибору і відповідних методів лікування їх послідовного застосування і поєднання.

Багато зусиль вчених спрямовано для вивчення патофізіологічних процесів ушкодження спинного мозку, взаємопов'язаних молекулярних реакцій щодо можливості способів відновлення нейронів, розробки нейропротекторних та імуномодуючих взаємодій і впливів які спрямовані на якісну нейрорегенерацію.

Запропоновано та змінено багато стратегічних підходів, щоб подолати низку подій, які зумовлюють нейродегенерацію та зменшення вторинного пошкодження нейронів [71-73].

Попередній досвід вітчизняної розробки теми висвітлений у працях Цимбалюка В.І., Ямінського Ю.Я., Лузана Б.М., Третьяка І.Б. На підставі отриманих раніше в нашій установі даних [84] принципово доповнено схеми лікування таких пацієнтів новими лікувальними методиками, і серед них - електростимуляцію спинного мозку, яка доповнює інші хірургічні методики.

Травма спинного мозку, зазвичай, призводить до постійної втрати рухової, сенсорної та вегетативної функції та їх поєднання. Недавні клінічні дослідження показали, що епідуральна стимуляція спинного мозку може стати вагомим доповненням для відновлення нижніх кінцівок та інших неврологічних функцій [74-79].

Клінічні досягнення ЕЕС відновлення сенсомоторної функції в осіб із ТСМ ґрунтуються на відновленні провідникових шляхів, в комплексі з нейрореабілітаційним підходом.

Огляд останніх клінічних результатів відновлення опорно-рухового апарату при повній ТСМ; обговорення сучасного розуміння електричної нейромодуляції та шляхів передачі сигналу, задіяних у спинномозкових локомоторних мережах; перегляд поточних викликів модуляції рухової системи та майбутні напрямки до інтегративного нейровідновлення – це найбільш важливі питання в спінальній нейрореабілітації. Відомо, що початкова деполяризація відбувається на рівні пропріоцептивних аферентів дорсального корінця великого діаметру, які, будучи інтегрованими з міжнейрональними та латентними залишковими супраспінальними транслезійними зв'язками, можуть рекрутувати локомоторні центри та збільшувати моторні одиниці, розташовані нижче [55].

Спінальна епідуральна стимуляція впливає на зміни збудливості в спинномозкових мережах і супраспінальних мережах. Різні параметри стимуляції селективні щодо полегшення стояння або крокування, а також можуть мати потенціал для посилення безлічі інших сенсомоторних і вегетативних функцій. Дослідження механізмів, які впливають трансформацію ушкоджених спинномозкових мереж і активність нейропластичності, імовірно, сприятиме виявленню ключових механізмів, які лежать в основі неврологічного посилення та відновлення моторики після важкого паралічу.

ТСМ призводить до втрати рухової та сенсорної функції, нейрогенного кишечника та сечового міхура, спастичності та хронічного болю. Хронічний біль виникає приблизно у 70% пацієнтів, які перенесли ТСМ [80]. Хронічний біль, що виникає внаслідок ТСМ, можна розділити на три основні типи: ноцицептивний, нейропатичний і вісцеральний. Вісцеральний біль локалізується головним чином у грудній клітці та черевній порожнині та пов'язаний з нейрогенними захворюваннями кишечника та сечового міхура.

Ноцицептивний біль є найпоширенішим і може виникнути через первинну травму, м'язову слабкість, спазми, контрактури. Нейропатичний біль після ТСМ класифікується як біль на рівні травми або нижче і може виникнути гостро або через рік після початкової травми [81-83].

Останнім часом підвищена увага приділяється лікуванню невропатичного болю після ТСМ.

Патофізіологія хронічного нейропатичного болю після ТСМ відрізняється залежно від того, чи розташовані залучені нейрони вище або нижче рівня пошкодження [84].

Вважається, що вище рівня пошкодження гіперзбудливість нейронів спричинена змінами експресії рецепторів N-метил-d-аспартату та глутамату, натрієвих і кальцієвих каналів, посиленням гліальної активації та зниженням функціональності ендогенних інгібіторних нейронів [75,85]. Нижче рівня ушкодження механізм чітко не зрозумілий, але припускають, що він походить від більш сенсibiliзованого спіноталамічного тракту, спонтанної активності в розгальмованих полісинаптичних шляхах, таламусі та корі [86-89]. Нейропатичний біль — вторинний, зумовлений захворюваннями та травмами нервової системи, лікували за допомогою ЕЕС [81]. Електричні імпульси мають параметри стимуляції, включаючи амплітуду, частоту та ширину імпульсу, які змінюються для оптимізації досягнутого рівня результату [90-92].

Незважаючи на удосконалення стратегій лікування ТСМ, побудовані на стратегії заміни клітин (*ембріональні клітини*), імплантовані полімерні каркаси та різні інші агенти (ростові фактори, молекули, що направляють аксони, і гліозно-інгібуючі молекули), значне функціональне відновлення залишається неповним, і досі немає чіткої оцінки ситуації. Особи з неврологічними наслідками при ТСМ, які мають залишкову здатність генерувати вольову м'язову активацію, можуть отримати користь від певних нейрореабілітаційних схем, що включають терапію, засновану на активності, для сприяння реорганізації мережі з помірними функціональними перевагами.

Однак, це зазвичай, не відбувається в умовах повного моторного паралічу [80-83]. Допоміжні технології, такі як екзоскелети та пристрої для підтримки ваги, як засоби фізичної реабілітації [85], далекі від заміни інвалідного візка у повсякденній мобільності.

Недавні дослідження показали, що ЕЕС може відновити функціональні та вольові рухи нижніх кінцівок після ТСМ, навіть за умов хронічного повного паралічу [86–91]. Тут ми розглядаємо останні досягнення в епідуральній стимуляції для відновлення рухової активності після клінічно визначеного повного рухового паралічу. Обговорюється передбачувані нейронні мережі та шляхи, модульовані епідуральною стимуляцією, огляд систем керування рухом, концепція центральних генераторів шаблонів для пересування та сучасні погляди на нейромодуляцію рухової системи.

ЕЕС з'явилася наприкінці 1960-х років, коли нейрохірург Норман Шейлі та аспірант інженерного факультету Томас Мортімер розробили «стимулятор спинного стовпа» — перший імплантований спосіб стимуляції спинного мозку. Подальші дослідження щодо відновлення рухової функції почалися в 1980-х і 1990-х роках, коли під час спроб полегшити спастичність, пов'язану з розсіяним склерозом, кілька дослідників випадково спостерігали покращення довільної моторики, функції сечового міхура та кишечника [85-88]. Герман і його колеги першими продемонстрували, що спінальні епідуральні імпланти, які зазвичай використовуються для лікування хронічного болю, також можуть бути використані для сприяння покращенню рухової функції у людей після лікування травми спинного мозку. Вони повідомили, що два суб'єкти з неповними травмами, які могли пересуватися, але зі значними труднощами, могли крокувати ефективніше та з меншим метаболічним стресом під час активної епідуральної стимуляції. Учасники також відзначили більшу легкість крокувати під час активної стимуляції [91–95]. Десятиліття попередніх доклінічних досліджень стали стимулом для підтвердження концепції на людях з неповними ушкодженнями, що зрештою стало стимулом

для дослідження цього підходу в осіб із більш серйозними ушкодженнями спинного мозку та повним моторним паралічем.

Епідуральна стимуляція створює електричні поля, що локалізуються в ділянці дорсальної поверхні спинного мозку за допомогою електродів, імплантованих на тильну частину твердої оболони, як правило, через циліндричні лінійні багатоконтактні електроди, імплантовані черезшкірно, або багатоконтактні масиви пластин, імплантовані за допомогою ламіномотії. Кожен контакт забезпечує індивідуально програмовану провідну поверхню, що призводить до гнучких комбінацій моно-, бі- або мультиполярної стимуляції. Вивідні дроти тунелюються до віддаленого підшкірного імплантованого генератора імпульсів, який можна модулювати електронно і часто перезаряджається. У вищезазначених дослідженнях переважно застосовували електроди лопатного типу над попереково-крижовим розширенням спинного мозку (спинальні рівні тіл хребців Th11-L1, Th10-L1 або Th10-Th12) [93-95].

У 2011 році Харкема та ін. [96-98] показали, що епідуральна стимуляція в осіб з повним руховим паралічем може відновити функціональні рухи нижніх кінцівок, крокування та стояння з навантаженнями. До дослідження було включено 23-річного учасника з хронічним високогрудним моторним повним сенсорним неповним ТСМ (AIS-B). Перед імплантацією учасник спочатку пройшов 26-місячну реабілітацію опорно-рухового апарату з 170 тренуваннями з підтримкою ваги тіла. Потім учасник пройшов хірургічну імплантацію 16-контактної епідуральної електродної матриці (5-6-5 Specify, Medtronic, Міннеаполіс, Міннесота), розміщеної на задній поверхні попереково-крижового розширення разом із імплантованим генератором імпульсів (Restore ADVANCED, Medtronic, Міннеаполіс, Міннесота). Стимуляція в поєднанні з цілеспрямованим пропріоцептивним впливом (наприклад, пасивне положення ніг і підтримка суглобів тренажерами) дозволяло учаснику виконувати стояння з обтяженням протягом коротких періодів часу до 4,25 хв. Використовуючи підтримку ваги та балансу та

піддаючись пропріоцептивним введенням на біговій доріжці, учасник також міг генерувати ритмічні моделі кроків, схожі на локомоторні, хоча й недостатні для самостійного пересування. Стояння викликалося в нижніх попереково-крижових сегментах з частотою 15 Гц, тоді як крокування полегшувалося на більш високих частотах у діапазоні 30–40 Гц. Моторна потужність залежала від сенсорних сигналів: стояння вимагало двостороннього осьового навантаження, а крокування вимагало динамічної зміни навантаження з відповідним положенням ніг.

Після 7 місяців фізичної реабілітації та епідуральної стимуляції пацієнт відновив вольовий контроль над руховими функціями нижніх кінцівок під час активної стимуляції. Вторинні результати також включали покращення контролю артеріального тиску, функції терморегуляції, сечового міхура, кишечника та статевої функції [98].

Електрофізіологічне тестування за допомогою транскраніальної магнітної стимуляції та соматосенсорних викликаних потенціалів було проведено для підтвердження класифікації травми та показало відсутність моторно-викликаних потенціалів нижніх кінцівок у всіх пацієнтів.

Нещодавно повідомили про початкові результати дослідження E-STAND («епідуральна стимуляція після неврологічного пошкодження»). Ці учасники не проходили спеціальну попередню нейрореабілітацію перед імплантацією пристрою. У це дослідження спочатку були включені дві жінки-учасниці з торакальним AIS-A TCM у відносно старшому віці порівняно з попередніми дослідженнями (48 та 52 роки, відповідно) та відносно довшим інтервалом хронічного перебігу травми (5 та 10 років після травми відповідно). Ці пацієнти також отримали попереково-крижові епідуральні електроди та імплантовані генератори. Автори повідомили про відновлення вольового контролю при першому застосуванні епідуральної стимуляції. Цікаво, що автори також спостерігали відновлення вольового сечовипускання в одного учасника (хоча й неповне із залишковим об'ємом), полегшення ортостатичної гіпотензії в одного учасника та покращення сексуальної функції. Пенья Піно

та ін. [99] після того, як повідомили про результати подальшого спостереження загалом семи учасників і виявили відновлення вольового контролю в усіх суб'єктів (шість AIS-A та один AIS-B). Після тривалої стимуляції четверо із семи учасників зрештою зберегли вольовий контроль навіть у періоди припинення стимуляції. Тим не менш, величина та точність моторної активації залишалися вищими при увімкненій стимуляції, ніж при вимкненій. Нарешті, Gorgey et al. повідомили про дослідження використання передбачуваних переваг епідуральної стимуляції для посилення ходьби за допомогою екзоскелета [100]. В одного учасника з C7 AIS-A TCM автори виявили поступове поліпшення ходи зі зменшенням допомоги при розгойдуванні та до 573 кроків без допомоги (50% від загальної кількості кроків) під час використання екзоскелета [100]. Електростимуляція спинного мозку для зменшення хронічного невропатичного болю вже добре вивчена і впроваджена. Її використовують як елемент лікування комплексного регіонального больового синдрому та стійкої радикулопатії.

Результати покращення вегетативної функції постійно повідомлялися в багатьох дослідженнях у різних центрах, включаючи покращення контролю сечового міхура та кишечника, сексуальної функції, регуляції артеріального тиску, функції терморегуляції, збільшення м'язової маси та покращення складу тіла [101]. Додаткові застосування для інших неврологічних функцій, таких як відновлення функції дихання та кашлю, також досліджуються та переглядаються в інших дослідженнях.

Останнім часом виділяють таргетну ЕЕС, яка розроблена для надання цілеспрямованого впливу у фазово-залежний спосіб на відміну від безперервної нешаблонної стимуляції. «Цільову стимуляцію спинного мозку» або «біоміметичну стимуляцію» запропонували Куртін та Блох [101] на основі просторово-часової динамічної активації цільових підмножин нервових корінців, узгоджених із фазами ходи з метою досягнення більш природних моделей активації та відносно більш плавної та скоординованої рухової активації. Порівняно з невибірковою стимуляцією, зосередженою на

підвищенні глобальних рівнів збудливості, концепція спрямованої стимуляції спинного мозку базується на модульній та динамічній активації селективних дорсальних корінців, які представляють і взаємодіють з певними «руховими гарячими точками» всередині спинного мозку. Автори розробили гнучку багатоелектродну матрицю для дослідницького середовища і клінічно доступні матриці лопаткових електродів [86], щоб забезпечити більшу просторову вибірковість уздовж поздовжнього розширення попереково-крижового відділу. З цією метою більш проксимальні поперекові сегменти хребта, як правило, пов'язані з міотомами згиначів стегна та колінного суглоба, тоді як більш дистальні нижні поперекові та крижові сегменти більш переважно пов'язані з руховими групами розгиначів. Подібним чином латеральність контактів може дозволити чергувати патерни активації між двома нижніми кінцівками з метою синхронізації електричних подразників із фазами природного циклу ходи (наприклад, стійка, хитання, фаза руху). Це потенційно може посилити фізіологічний синергізм спинномозкового контуру, мінімізуючи одночасну коактивацію потенційно антагоністичних контралатеральних інгібуючих контурів. Динамічне часове моделювання алгоритмів стимулів можна гнучко регулювати, щоб збігатися з фазами циклу ходи, а тренування учасників, що відповідають конкретним завданням, може додатково збільшити відповідний час вольового зусилля за допомогою нейронного протеза. Наприклад, скоординоване та селективне послідовне збудження задніх корінців для активації згиначів стегна та тильних згиначів щиколотки для початку фази маха вперед, з наступною активацією розгиначів колінного суглоба для сприяння прийняттю ваги та фази стійки, а потім розгиначів стегна та гомілковостопного суглоба для сприяння руху. Спочатку досліджуваний на гризунах і приматах цей підхід показав здатність відновлювати функціональні рухи нижніх кінцівок і крокові рухи за допомогою бігової доріжки. У нещодавньому опублікованому клінічному дослідженні: Courtine, Bloch та співавтори [101] залучили трьох осіб із хронічним моторним неповним середньо-/нижньо-шийним ураженням

тривалістю 4–6 років після травми. Важливо, що на відміну від інших досліджень, які обговорювалися раніше, це дослідження було зосереджено на суб'єктах із менш важкими ступенями AIS (2 AIS-C, 1 AIS-D). Суб'єктам було імплантовано епідуральні пластинчасті електроди (Specify 5-6-5, Medtronic, Міннеаполіс, Міннесота) у поєднанні з імплантованими генераторами імпульсів (Activa RC IPG, Medtronic, Міннеаполіс, Міннесота) з використанням комбінації флюороскопічного та електрофізіологічного контролю за допомогою внутрішньом'язового введення. Автори виявили миттєве покращення вольового контролю навіть над раніше паралізованими групами м'язів. В усіх учасників автори повідомили про відновлення вольового контролю нижніх кінцівок, викликаючи рухи одним суглобом, стояння з повною вагою та функціонально скоординовані комплексні рухи, такі як пересування на бігівій доріжці до 1200 кроків і тривалістю 1 годину, і навіть балансування з вагою. Автори виявили кращу рухову координацію та продуктивність, використовуючи свою парадигму динамічної цільової стимуляції порівняно з безперервною тонічною стимуляцією. Цей висновок загалом узгоджується з результатами групи клініки Мейо, яка також повідомила про покращену рухову продуктивність завдяки більш селективній програмі стимуляції з чергуванням [91].

Епідуральні електроди впливають на відносно широке поле, діючи на різні типи тканин на рівнях, які значною мірою визначаються специфічними властивостями провідності кожного типу тканини. Спинномозкова рідина (СМР) є високопровідним середовищем, що дозволяє електричному струму поширюватися. Одним із збудливих елементів при епідуральній стимуляції можуть бути дорсальні корінцеві аференти, особливо на рівні вертикальних проєкцій дорсальних входових зон [91-100]. Корінці попереково-крижового дорсального нерва мають інтратекальний компонент, що розміщує їх поблизу стимулюючих електродів із сприятливими мембранними властивостями для електричної деполяризації [96]. Відповідно до класичної кабельної теорії діаметр аксона прямо пропорційний ємності мембрани та обернено

пропорційний опору мембрани [85]. Таким чином, мієлінізовані аксони великого діаметру, як правило, більш збудливі електричним струмом, переважно складаються з пропріоцептивних волокон, за якими йдуть інші механорецептивні волокна.

Точність опису зазначених анатомо-фізіологічних особливостей спинномозкових корінців не викликає сумніву. Однак ізольований фокус на діаметрі аксона/розмірі волокна як єдиному рушійному факторі електричної нейромодуляції для пояснення надзвичайно складних рухових поведінкових ефектів епідуральної стимуляції (та інших методів нейромодуляції) не враховує належним чином комплекс фізіологічних медіаторів, що лежать в його основі. Електрична нейромодуляція змінює фізіологічну активність дендритів і соми в інших характеристиках, за винятком запуску потенціалу дії. Крім того, чи можна припустити, що властивості провідності аксона функціонально аналогічні мережі нейронів в умовах *in vivo*? Мало відомо про основну фізіологію мережевої динаміки, особливо в умовах *in vivo*. Коротше кажучи, існує багато причин для обережності при припущенні, що розмір аксона є єдиним критичним фактором у поясненні поведінкових результатів спинномозкових мереж, коли вони нейромодульовані в широкому діапазоні параметрів стимуляції та уражень хребта, які можуть сильно варіювати. Крім того, більша інтенсивність стимулу може призвести до достатнього розширення електричного поля, щоб охопити дорсальні сегменти спинного мозку та викликати нейромодулюючі зміни безпосередньо волокон дорсальних стовпів. Нейромодуляція може змінювати стан збудливості та активності внутрішніх спинномозкових і надспинальних мереж.

Стосовно технологічних стратегій, місце електричної стимуляції, деталі конструкції електродів, а також довгий список параметрів стимуляції та часових шаблонів, які використовуються, мають різні рекомендації.

Варто відзначити, що фізіологічний вплив кожного фактору має виражену взаємозалежність, тобто зміна одного параметра з високою

ймовірністю змінить реакцію інших параметрів, так що загальний результат важко передбачити для будь-якого конкретного суб'єкта чи середовища.

З патофізіологічної точки зору механізми, на які впливає кожна із зазначених змінних, залишаються недостатньо вивченими. Залишається незрозумілим, наскільки тісно зазначені технологічні змінні пов'язані з фізіологічними механізмами. Наприклад, розміщення електродів лише нечітко визначає шляхи та типи нейронів, які модулюються. Електрична активація аферентних волокон дорсального корінця великого діаметру як єдиного фізіологічного механізму, що керує складними та вольовими руховими патернами, може не відповідати комплексним механізмам, залученим у виклик спостережуваних рухових патернів.

Механізм покращення відновлення рухових функцій у відповідь на епідуральну стимуляцію залишається неповністю визначеним. Як тонкий моторний контроль руху модулюється в спинномозковій системі, які механізми забезпечують патерни активації багатьох рухових груп і, в меншій мірі, рівень залучення рухових одиниць в одну рухову групу, залишається невідомим. Механізми модуляції динаміки постійно мінливої комбінації багатьох моторних пулів ще належить визначити. З цих причин ми вважаємо, що в міру розвитку технологій разом із більш детальним розумінням нейрофізіологічних механізмів на мережевому та системному рівні стає все більш можливим успішніше втручатися у внутрішні стратегії контролю спинномозкових мереж.

Величина стимуляції може регулюватися для прямої індукції чи активації рухової функції. Більшість методик, що використовуються на сьогоднішній день, використовують, в основному стимуляцію, що перевищує безпосередній «пасивний» моторний поріг, і полегшення «активного» моторного контролю через підпорогову мережеву модуляцію. Припускаємо, що вплив епідуральної стимуляції на контроль руху полягає в модулюванні станів фізіологічної активності вибраних мереж, тобто близькості збудливого рівня (відносно моторного порогу мережі) до активаційного сигналу. Незважаючи на те, що в

даний час переважний вплив покладено на залучення пропріоцептивних аферентів, моделі викликаних рухів, як видається, включають широкий спектр специфічної рухової поведінки, ймовірно, за межами простої електричної активації «все або жодної» будь-якого окремого типу аферентного рецептора/волокна.

## **Висновки**

Електростимуляція може відновлювати, здебільшого частково, втрачені сенсорні, моторні та вегетативні функції. Епідуральна стимуляція покращує контроль рухів шляхом зміни м'язової синергії [102]. Генератори центральних імпульсів (ГЦІ) зазвичай визначаються як мережа нейронів, здатних створювати та передавати електричні імпульси, зокрема керуючи стереотипною, ритмічною руховою поведінкою. Було показано [103-107], що кілька ГЦІ, локалізованих у стовбурі головного та спинного мозку, лежать в основі експресії складної поведінки, такої як ковтання, жування, дихання, дефекація, сечовипускання, еякуляція. Вплив епідуральної стимуляції на ці нейрони сприяє відновленню вказаних функцій. Сила і ступінь відновлення м'язової сили та чутливого компонента залежить від багатьох факторів і вони індивідуальні (і має специфіку в кожному випадку). Проводиться багато досліджень для пошуку нових технологій, методик, режимів епідуральної електростимуляції з метою отримання стійких ефективних результатів [106-110].

Активно йде вивчення можливостей і результатів поєднання застосування епідуральної електростимуляції з засобами фізичної реабілітації і удосконалюються традиційні методики [110-112]. Актуальність методики ЕЕС зростає в сучасних умовах, коли частота травматичних ушкоджень спинного мозку через війну в Україні значно збільшилась.

## РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

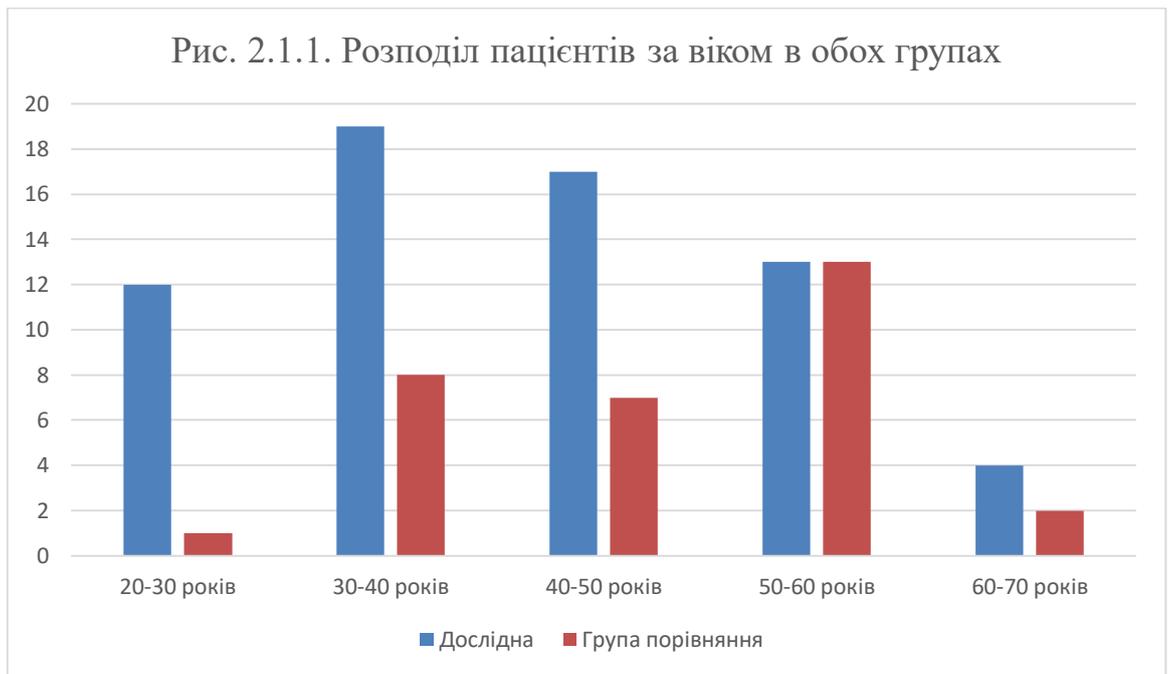
### 2.1. Клінічна характеристика пацієнтів в досліджуваних групах

Робота ґрунтується на аналізі результатів відновного лікування 96 пацієнтів з наслідками травматичного ушкодження спинного мозку, що лікувались в клініці відновлювальної нейрохірургії ДУ "Інститут нейрохірургії ім. акад. А.П.Ромоданова" НАМН України протягом 2016 – 2024 років.

У дослідній групі пацієнти були у віці 20-69 років, середній вік – 45.4 роки (табл.2.1.1), всього 65 пацієнтів, з них 11 жінок і 54 чоловіків. У чоловіків частіше відбуваються травматичні ушкодження спинного мозку.

В групі порівняння пацієнти були у віці 24-60 років, середній вік – 41.9 років (табл.2.1.1), всього 31 пацієнтка, з них 11 жінок і 20 чоловіків. Отже, в обох групах середній вік статистично не відрізнявся: 41,91 (95% ДІ: 38,92 - 44,9) проти 45,26 (95% ДІ: 41,61 - 48,91) в групі порівняння ( $p=0,1523$  за тестом Вілкоксона на суму рангів).

Більш детальний розподіл пацієнтів за віком в досліджуваній групі та групі порівняння вказаний на рисунку 2.1.1.



**Таблиця 2.1.1**

Розподіл хворих в обох групах за статтю.

Стать	Групи		Всього	P
	Дослідна	Порівняння		
Чоловіки	54(83%)	24 (77.4%)	78 (81,25%)	0,7006 <sup>1</sup>
Жінки	11(17%)	7(12.6%)	18 (18,75%)	
Усього	65	31	96	

1 - тест хі-квадрат Пірсона з поправкою на неперервність Йейтса.

Отже, 81,25% пацієнтів склали особи чоловічої статі, як здебільшого в світі переважають травми у чоловіків. В обох групах склад пацієнтів за статтю статистично не відрізнявся (54 (0,83; 95% ДІ: 0,71-0,91) та 24 (0,77; 95% ДІ: 0,58-0,9)).

Головною причиною травм були дорожно-транспортні пригоди (ДТП), падіння з висоти і в тому числі пірнання, а в останні роки це вогнепальні та мінно-вибухові ушкодження спинного мозку.

Локалізація ушкодження спинного мозку є суттєвим чинником, що визначає лікувальну тактику. За рівнем ушкодження в таблиці 2.2.2 показано розподіл пацієнтів в обох групах: хворих з наслідками травми шийного відділу спинного мозку (С3 – С7 сегменти) було 27 (28,2%), грудних сегментів (Th1 – Th12) – 68 (70,83%), поперекового відділу спинного мозку (L1) – 1 (1%).

Таблиця 2.1.2

Розподіл хворих за рівнем травми

Рівень травми	Групи		Всього	р
	Дослідна	Порівняння		
Шийний відділ	20 (0,31; 95% ДІ: 0,20 - 0,44)	7 (0,226; 95% ДИ: 0,1 - 0,42)	27 (28.2%)	0,6414 <sup>1</sup>
Грудний відділ	44 (0,68; 95% ДІ: 0,55 - 0,79)	24 (0,774; 95% ДІ: 0,5- 0,9)	68 (70.8%)	
Поперековий відділ	1 (0,02; 95% ДІ: 0 - 0,09)	0 (0; 95% ДІ: 0 - 0,14)	1(1%)	
Всього	65	31	96	

<sup>1</sup> - точний тест Фішера.

Значно менше було пацієнтів з локалізацією травми в поперековому та більш нижчих відділах, всього один пацієнт в дослідній групі та відсутність таких в групі порівняння.



Це викликано тим, що взагалі на цьому рівні травми зустрічаються рідше, а ушкодження сегментів там відбувається ще рідше, тому в нашій роботі були пацієнти з ушкодженням шийного та грудного відділів хребта (Рис. 2.1.2).

Час після ушкодження спинного мозку до хірургічного лікування коливався від 1 місяця до 8 років [113,114]. В термін від 1 місяця до 1 року після травми було 55 пацієнтів (57,3 %) хворих (29 в контрольній та 26 в дослідній групах), з 1 до 2 років – 22 (22,9 %) хворих (1 в контрольній та 21 в дослідній групах), з 2 до 3 років – 7 (7,3 %) хворих (1 в контрольній та 6 в дослідній групах), в термін з 3 до 4 років – 2 пацієнта (2,2 %) в дослідній групі хворих, в термін з 4 до 5 років після травми прооперовано було 4 пацієнта (4,16 %) дослідної групи, в термін з 5 до 6 років після травми прооперовано було 2 пацієнта (2,2 %) дослідної групи, в термін з 6 до 7 років після травми було 2 пацієнта (2,2 %) дослідної групи і в термін з 7 до 8 років після травми було проліковано 2 пацієнта (2,2 %) дослідної групи.



Як видно з рис. 2.1.3, в дослідній групі було більше пацієнтів з травмами давністю понад 2 роки. Причиною тому є те, що в ранні строки після травми на першому місці стоять завдання декомпресії спинного мозку після травми та стабілізації його відділів, що не завжди може привести до відновлення неврологічних функцій і тому звертаються до встановлення епідуральної електростимуляції спинного мозку, як ще одного засобу відновлення втрачених функцій, навіть на значно пізніших строках після травми (2-8 років). Часто ще, метою хірургічних утручань у цих хворих в пізні терміни, була корекція больового синдрому та дисфункцій сечового міхура.

З метою рівномірного розподілу в групах та додаткової оцінки результатів лікування з урахуванням давності травми в досліджуваній групі ми виділили підгрупу – Досліджувана група (а), в якій був, як і в групі порівняння 31 пацієнт і у яких давність травми до хірургічного лікування становила до 2 років. Характеристика пацієнтів та порівняння даних за характеристиками групи порівняння показані в таблиці 2.1.3.

Таблиця 2.1.3

Розподіл пацієнтів в Дослідній групі (а) та групі порівняння за статтю, віком, локалізацією ушкодження та давністю травми.

Показник	Дослідна група (а) (n = 31)	Група порівняння (n = 31)	P
Чоловіки	25 (0,81; 95%ДІ: 0,62-0,92)	24 (0,77; 95%ДІ: 0,58-0,9)	1 <sup>1</sup>
Жінки	6 (0,19; 95%ДІ: 0,08-0,38)	7 (0,23; 95%ДІ: 0,1-0,42)	
Вік, роки	40,21 (95% ДІ: 35,05 - 45,15)	45,26 (95% ДІ: 41,61 - 48,91)	0,0618 <sup>2</sup>
Рівень: шийний	9 (0,29; 95% ДІ: 0,149 - 0,482)	7 (0,226; 95% ДІ: 0,1 - 0,42)	0,57 <sup>3</sup>
грудний	21 (0,677; 95% ДІ: 0,485 - 0,827)	24 (0,774; 95% ДІ: 0,5-0,9)	
поперековий	1 (0,032; 95% ДІ: 0,002 - 0,185)	0 (0; 95% ДІ: 0 - 0,14)	
Час від травми до операції, міс	13,74 (95% ДІ: 12,22 - 15,27)	12,29 (95% ДІ: 10,2 - 14,38)	0,0713 <sup>2</sup>

<sup>1</sup> - Тест хі-квадрат Пірсона з поправкою на неперервність Йейтса

<sup>2</sup> - Тест Вілкоксона на суму рангів з поправкою на неперервність

<sup>3</sup> - точний тест Фішера.

Як видно із таблиці в обох групах характеристики за статтю, віком, локалізацією ушкодження та давністю травми не відрізняються статистично, розподіл рівномірний. Але ми проводили розрахунки даних порівняння результатів лікування в усіх трьох групах, тобто співставлення результатів в Дослідній групі та Дослідній (а) групі з групою порівняння для вивчення впливу давності травми на результат епідуральної електростимуляції і

доцільність її проведення навіть в пізні строки після травми при відсутності ефекту від реабілітації.

Викладені у підрозділі 2.1 дані опубліковано у публікаціях:

1. Nekhlopochyn, O. S., Verbov, V. V., Cheshuk, I. V., & Vorodi, M. V. (2021). Surgical management of traumatic irreducible spondyloptosis of thoracolumbar junction. *Ukrainian Neurosurgical Journal*, 27(2), 56–64. <https://doi.org/10.25305/unj.228926>
2. Nekhlopochyn, O., Verbov, V., Tsymbaliuk, I., Vorodi, M., & Cheshuk, I. (2021). Neuropathic pain as a predictor of neurological disorders regression in patients with spinal cord traumatic injury. *PAIN, JOINTS, SPINE*, 11(3), 110–117. <https://doi.org/10.22141/2224-1507.11.3.2021.243047>

## **2.2. Клініко-неврологічні методи дослідження хворих.**

Неврологічний статус хворих з наслідками травматичного ушкодження спинного мозку відіграє важливу роль у плануванні відновного хірургічного лікування. Неврологічна симптоматика відрізнялась в залежності від рівня ушкодження спинного мозку. Як правило оцінюють: рухові порушення, порушення чутливості, наявність порушень функції сечового міхура, ступінь больового синдрому, присутність спастичності та трофічні ускладнення.

Шкала ASIA використовується для оцінки рухового та чутливого дефіциту. Ця шкала була опублікована Американською асоціацією пошкоджень спинного мозку. Критеріями стану порушень функції спинного мозку є сила основних груп м'язів та тактильної і больової чутливості. При оцінці функції верхніх кінцівок вивчають двоголовий м'яз плеча та плечовий м'яз (функція згинання передпліччя), короткий і довгий розгиначі кисті, триголовий м'яз плеча, згиначі пальців кисті, абдуктор V пальця. Для оцінки функції нижніх кінцівок вивчають стан здухвинно-поперекового м'язу, чотириголового м'язу стегна, перонеальної групи м'язів, розгинача великого пальця та камбаловидного

м'язу. М'язова сила оцінюється за 6- бальною шкалою: 0 балів – повна відсутність рухів, 1 бал – видимі скорочення м'язів, 2 бала – активні рухи в полегшеному положенні (наприклад згинання та розгинання в колінному суглобі в положенні “лежачи на боку”), 3 бали – активні рухи, що долають силу тяжіння, 4 бали – активні рухи, що долають незначний опір, 5 балів – активні рухи, що долають повний опір.

Для оцінки спастичності використовували Модифіковану шкалу Ашворса (1987), яка дещо доповнила оригінальну шкалу, впроваджену ще в 164 році. Шкала передбачає оцінку сили опору м'язів до пасивного руху в кінцівках з різною швидкістю. Оцінювання проводять за 5 бальною шкалою в діапазоні від 0 до 4 балів. 0 – відсутність супротиву і 4 – ригідність кінцівки. В модифікованій шкалі додано ступінь 1+, як вказано в таблиці 2.2.1.

Таблиця 2.2.1.

Модифікована шкала Ашворса

Бал	Опис ступеня спастичності
0	М'язовий тонус в нормі
1	Незначне раптове підвищення тону м'язів
1+	Незначне раптове підвищення тону м'язів до половини амплітуди рухів
2	Підвищення тону м'язів більше половини амплітуди рухів без утруднення пасивних рухів
3	Суттєве підвищення тону м'язів та утруднення пасивних рухів
4	Ригідне положення кінцівки

Для оцінки больового синдрому використовували цифрову шкалу градації болю, бали якої відповідають візуальній аналоговій шкалі болю:

Відсутність чи зовсім незначний біль – 0-1

Слабкий біль – 2-4 бали

Помірний біль – 4-6 балів

Сильний біль – 6-8 балів

Нестерпний біль – 8-10 балів

Бали встановлював сам пацієнт на лінії довжиною 10 см позначаючи ступінь болю від 0 до 10 балів.

Викладені у підрозділі 2.2 дані опубліковано у [114]

### **2.3.Методика проведення епідуральної електростимуляції спинного мозку.**

Операція виконується під загальною анестезією (внутрішньовенний з інтубацією та штучною вентиляцією легень). Положення пацієнта, лежачи на животі, в рамці Вільсона (поперековий та грудний відділи хребта) з моделюванням кіфозу та зафіксованою головою в скобі Мейфілда, з метою розширення міжостистих проміжків. Обробка операційного поля розчином бетадину (тричі) та спиртом. Хірургічна розмітка подальшого доступу ідентифікується з-за допомогою мобільної інтраопераційної рентген установки. Лінійний, пошаровий розріз шкіри та м'яких тканин над остистими паростками, довжиною 5-6 см. Пошаровий гемостаз. За допомогою мононожа проводиться субперіостальна дисекція та подальша скелетезація хребців. Кусачками «конхотом» та пістолетними кусачками «Керісона», проводиться видалення між остистої зв'язки та, при необхідності, остисті паростки та дуги хребців. Виконано доступ до твердої мозкової оболонки, гемостаз.

Паравертебрально, на віддалі 10 см від основної рани, проводиться лінійний, горизонтальний розріз шкіри та м'яких тканин, довжиною 3-4 см, і формується кишень для стимуляційної антени нижче підшкірної клітковини на підлеглих в рані м'язах. Через цей розріз вводиться антена системи для ЕЕС (Рис. 2.3.1)



Рис. 2.3.1. Фото операційного поля після розрізу шкіри для встановлення антени системи для ЕЕС. Заведення антени в рану

Після заведення антени в рану, фіксують її до фасції м'язів 2-3 вузловими швами за корпус. Потім заміряють довжину електродів, щоб вони вільно доставали до місця фіксації на твердій оболонці в зоні ушкодження спинного мозку. На рис. 2.3.2 показано, що довжина електродів є достатньою щоб їх вільно розташувати у підшкірному тунелі і фіксувати до твердої мозкової оболонки.



Рис. 2.3.2. Фото операційного поля. Антена встановлена в кишеню і довжина електродів є достатньою для встановлення системи для ЕЕС

За допомогою трубчастого провідника підшкірно в сформованому корцангом або зажимом Більрота тунелі протягуєм електроди до загальної рани.

Пластинки електродів підшиваються до поверхневого листка твердої мозкової оболонки, де відстань між катодом та анодом має бути як мінімум 2 см, та не більше ніж 4 см. На рис. 2.3.3 показано, що електроди фіксовані на достатній віддалі один від одного, як на цьому наполягають розробники [16].

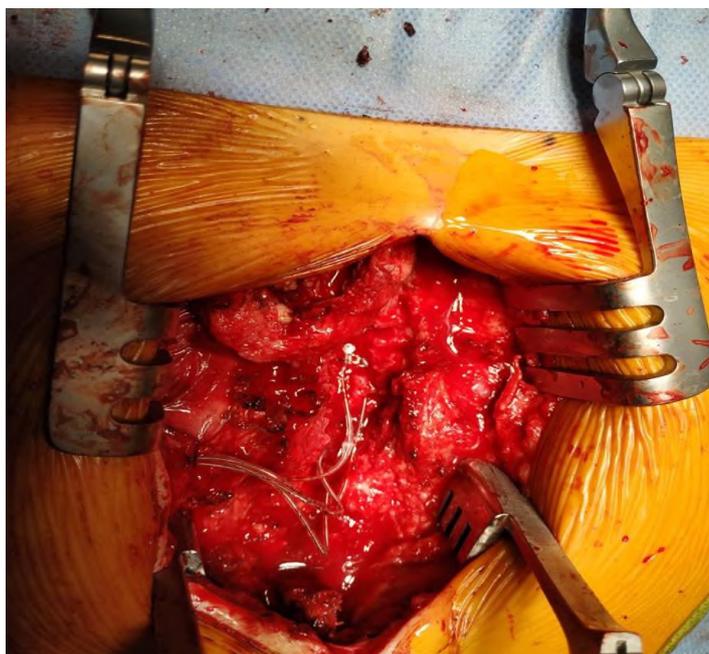


Рис. 2.3.3. Фото операційного поля після встановлення системи для ЕЕС

При необхідності проведення ламінектомії для декомпресії, мієлорадикулोलізу при давнених травмах і повторних оперативних втручаннях та фіксації хребців, їх виконують на першому етапі [115,116]. Питання про необхідність встановлення одночасно системи для епідуральної електростимуляції вирішується індивідуально в залежності від важкості травми та давності її. Не потрібно встановлювати систему для ЕЕС там де хірургічний етап корекції її може сприяти повному відновленню втрачених функцій і тоді система і сам процес ЕЕС не буде актуальним. Отже після завершення етапу фіксації хребта та декомпресії його в тих випадках, де

встановлення системи для ЕЕС буде доцільно, приступають до фіксації електродів та антени. Парні пластинки підшиваються паралельно на віддалі 0.5 см від середньої лінії дурального мішка, а електроди розміщують над системою транспедикулярної фіксації, як це зображено на рис. 2.3.4.

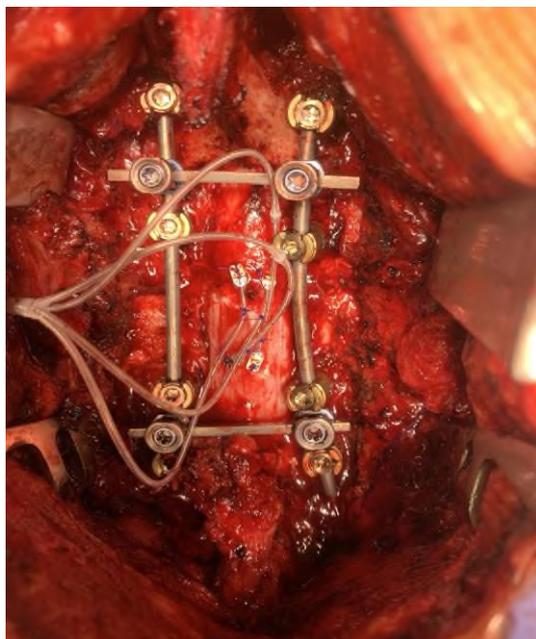


Рис. 2.3.4. Фото операційного поля після транспедикулярної фіксації хребта та встановлення системи для ЕЕС

Парні пластинки електродів підшиті паралельно на віддалі 0,5 см від дурального мішка, після встановлення транспедикулярної системи фіксації хребта. Дроти від електростимулюючої системи розміщують вільно, без натягу, в підфасціальному просторі над м'язевими структурами, щільно та пошарово ушиваються. Стимуляційну антену розміщують в м'яких тканинах на віддалі 10 см від країв рани. Пошарові шви на рани. Дренажі, за звичай, не встановлювали. Асептична пов'язка. При виникненні сером в післяопераційній рані проводили пункційну аспірацію їх в асептичних умовах.

Стимуляцію проводили на наступний день після хірургічного втручання. Нейростимулятор "НейСі-3М" (фірма «ВЕЛ», Україна), який має

два канали і п'ять режимів стимуляції, надав можливість для адаптації параметрів стимуляції у двох початкових режимах і для модуляції частот в інших трьох (Рис. 2.3.5).



Рис. 2.3.5. Фото нейростимулятора "НейСі-3М"

Пацієнти самі проводили сеанси електростимуляції мінімум три рази на день, кожний з яких тривав від 15 до 20 хвилин. Спеціально відібрані параметри стимуляції для знеболення, сприяли негайному полегшенню болю, яке трималося в середньому до 4 годин. Покращення моторної функції кінцівки було відмічено в пізньому післяопераційному періоді.

Варто відзначити, що в післяопераційний період пацієнти також проходили комплексне лікування, включаючи реабілітацію, фізіотерапію та медикаментозну терапію. Оцінка динаміки перебігу захворювання проводилась через 3 ,6,12 місяців після хірургічного лікування. Параметри ЕЕС для генератора "НейСі-3М" наведені в таблиці 2.3.1.

Параметри ЕЕС для генератора "НейСі-3М"

Частота імпульсів (Гц)	40	40	30	20	17	15
тривалість імпульсів (мкс)	1350	1400	1350	1350	1400	1450
тривалість пачки імпульсів (с)	1	1	1	1	1	1

Контроль розміщення антени для ЕЕС проводили за допомогою МРТ дослідження (Рис.3.2.6).



Рис. 3.2.6. МРТ дослідження нижньогрудного та поперекового відділів хребта для контролю розміщення стабілізуючої системи та антени для ЕЕС

Контроль за розташуванням антени є необхідним процесом для виявлення можливого зміщення її, запалення чи гематоми м'яких тканинах кишені навколо. МРТ контроль (дослідження з потужністю не більше 1,5 Тесла) через 1-2 місяці після встановлення системи для ЕЕС. Але при

виявленні скарг на біль, дискомфорт та інші неприємні симптоми бажано повторити МРТ дослідження

Викладені у підрозділі 2.3 матеріали опубліковано у публікаціях:

1. Nekhlopochyn, O., Vorodi, M., & Cheshuk, I. (2022). AOSpine Thoracolumbar Spine Injury Classification System in determining the treating tactics of thoracolumbar junction traumatic injuries (literature review). *TRAUMA*, 23(2), 68-78.  
<https://doi.org/10.22141/1608-1706.2.23.2022.893>
2. Nekhlopochyn, O., Cheshuk, Y., Vorodi, M., Tsymbaliuk, Y., Karpinskyi, M., & Yaresko, O. (2022). Biomechanical State of the Operated Thoracolumbar Junction in Lateroflexion. *TERRA ORTHOPAEDICA*, (2(113), 58-67. <https://doi.org/10.37647/0132-2486-2022-113-2-58-67>

#### **1.4. Статистична обробка даних**

*Статистичну обробку даних* здійснювали за допомогою програмного забезпечення R (версія 4.2.2., R Foundation for Statistical Computing), яке розповсюджується згідно зі Стандартною громадською ліцензією GNU (GPL), версія 2. Аналізи проводились у середовищі RStudio (версія 2023.12.0+369 "Ocean Storm" Release).

Згідно зі стандартами біомедичних досліджень, ймовірність статистичної помилки першого роду (альфа) встановлювалась на рівні 0,05, а ймовірність помилки другого роду (бета) – на рівні 0,2. Відповідно, мінімальна достовірність статистичних критеріїв визначалась у 95%, а потужність дослідження – у 80%.

Для уніфікації представлення результатів описової статистики всі дані відображались залежно від характеру розподілу у форматі M (середнє) або Me (медіана) з 95% довірчим інтервалом, відповідно до загальноприйнятих принципів статистичної обробки даних.

Для обробки якісних номінальних даних виконувалось угруповання за аналізованим параметром, створення таблиць спряженості та розрахунок частоти з 95% довірчим інтервалом. Для виявлення статистично значимих відмінностей використовувався критерій  $\chi^2$ -квадрат Пірсона з поправкою Йейтса на неперервність або точний тест Фішера в разі, коли в одній з груп кількість спостережень не перевищувала п'ять.

Якісні категоріальні дані у цьому дослідженні оброблялися як кількісні дискретні, з урахуванням чіткої відповідності градації ступеню вираженості аналізованого параметра.

При аналізі кількісних даних відповідність нормальному закону розподілу перевірялася за допомогою критерію Шапіро-Уїлка. У разі підтвердження нормального розподілу:

- значущість відмінностей між двома пов'язаними вибірками оцінювалася за допомогою двостороннього t-тесту Стьюдента;
- різниці між двома незв'язаними вибірками аналізувалися за допомогою t-тесту Крамера-Уелча.

У разі невідповідності нормальному розподілу значущі відмінності між вибірками визначалися за допомогою тесту Манна-Уїтні або тесту Уїлкоксона на суму рангів.

### РОЗДІЛ 3

## АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ХІРУРГІЧНОГО ЛІКУВАННЯ УСКЛАДНЕНЬ ТРАВМИ СПИННОГО МОЗКУ В ГРУПІ ПОРІВНЯННЯ

Групу порівняння склав 31 пацієнт у віці 24-60 років, середній вік – 41.9 років, з них 11 жінок і 20 чоловіків.

Головною причиною травм були дорожно-транспортні пригоди (ДТП), падіння з висоти і в тому числі пірнання, а в останні роки це вогнепальні та мінно-вибухові ушкодження спинного мозку.

Локалізація ушкодження спинного мозку є суттєвим чинником, що визначає лікувальну тактику. За рівнем ушкодження в таблиці 3.1 показано розподіл пацієнтів в групі порівняння: хворих з наслідками травми шийного відділу спинного мозку (C5 – C8 сегменти) було 7 (22,6 %), грудних сегментів (Th1 – Th12) – 24 (77,4 %).

Таблиця 3.1

Розподіл хворих за рівнем травми в групі порівняння

Рівень травми	Група порівняння (кількість пацієнтів)
Шийний відділ	7 (0,226; 95% ДІ: 0,1 - 0,42)
Грудний відділ	24 (0,774; 95% ДІ: 0,5- 0,9)
Поперековий відділ	0 (0; 95% ДІ: 0 - 0,14)
Всього	31

Не було пацієнтів з локалізацією травми в поперековому та більш нижчих відділах. Це пов'язано з тим, що взагалі на цьому рівні травми зустрічаються рідше, а ушкодження сегментів там відбувається ще рідше,

тому в були набрані пацієнти з ушкодженням шийного та грудного відділів хребта.

Час після ушкодження спинного мозку до хірургічного лікування коливався від 1 місяця до 3 років. В термін від 1 місяця до 1 року після травми в групі було 29 хворих, в термін з 1 до 2 років був лише 1 пацієнт в дослідній групі, а з 2 до 3 років також був 1 пацієнт. Середній час після травми до хірургічного лікування в місяцях становив 12,29 (95% ДІ: 10,2 - 14,38). На жаль не було пацієнтів, яким оперативне лікування було проведено в перші 24 години після травми, як цього вимагають сучасні міжнародні стандарти [113]. Таких пацієнтів взагалі мало по причині організаційних факторів, а також, коли все ж таки їм проводиться нейрохірургічне втручання до 24 годин після травми, то кількість неврологічних розладів є значно меншою.

Основними ускладненнями ушкодження спинного мозку в пацієнтів контрольної групи були: затримка або нетримання сечі, наявність залишкової сечі, больовий синдром, спастичний синдром порушення сенсорної та моторної сфери.

За шкалою ASIA оцінювали ступінь рухового та чутливого дефіциту, інтенсивність болю в балах оцінювали за шкалою NPRS (Numeric Pain Rating Scale), інтенсивність спастики оцінювали за шкалою Ashworth (Ashworth Scale) в балах, затримку або нетримання сечі оцінювали по факту присутності, об'єм залишкової сечі в мілілітрах.

Затримка сечовипускання була у 24 (77 %) пацієнтів, а нетримання сечі констатували у 7 (23 %) пацієнтів цієї групи.

Інтенсивність болю за NPRS (Numeric Pain Rating Scale) становила в середньому 5,03 (95 % ДІ: 4,7 – 5,37) балів.

Середня інтенсивність спастики за шкалою Ashworth (Ashworth Scale) в балах становила 1,32 (95 % ДІ: 1,12 – 1,52).

Середній рівень порушення чутливості в групі порівняння за шкалою ISNCSCI в балах становив 0,35 (95 % ДІ: 0,15 – 0,56).

Середній рівень порушення моторики в групі за шкалою ISNCSCI в балах становив 0,35 (95 % ДІ: 0,03 – 0,68).

Основними видами оперативних втручань в групі порівняння були: декомпресивна інтерлямінектомія в залежності від рівня травми, дуру- або мієлорадикулोलіз, та в окремих випадках транспедикулярна фіксація хребців, також в залежності від рівня травми. Як уже було зазначено вище основна маса хворих – 29 (93,6 %) були прооперовані до 1 року після травми, але жоден не був прооперований до 24 годин після травми. По 1 (3,2 %) пацієнту було прооперовано в терміни з 1 до 2 років та з 2 до 3 років після травми. Після оперативного втручання, як показав аналіз, ступінь проявів ушкоджень спинного мозку зменшився, тобто результат лікування був позитивний.

Затримка сечовипускання була у 20 (64,5 %) (до операції у 24 (77 %)) пацієнтів, а нетримання сечі констатували у 11 (35,5 %) (до операції у 7 (23 %)) пацієнтів цієї групи. Затримка сечовипускання є більш гіршим проявом даної групи порушень і тому можна вважати, що є позитивний результат від оперативного лікування за даним типом порушень. На 4 пацієнта зменшились прояви затримки сечовипускання і в той же час на 4 пацієнта збільшилось нетримання сечі. Крім того середній об'єм залишкової сечі після оперативного

л

і

к

у

в

а

н

н

я

н

а

с

л

і

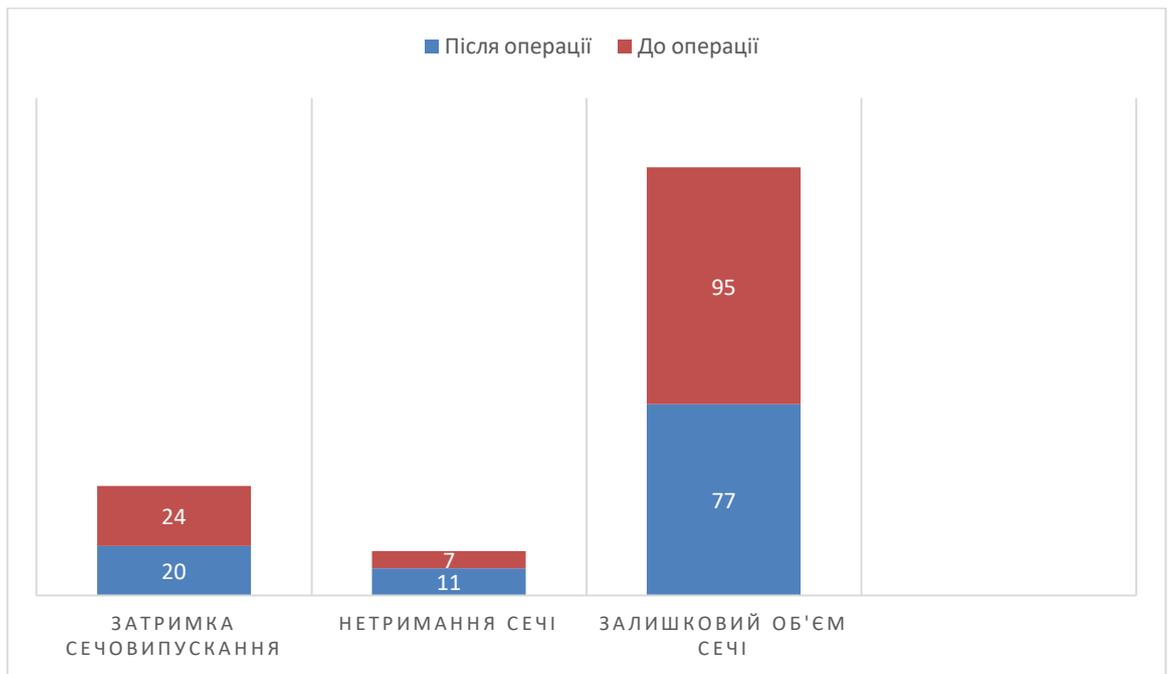


Рис.3.1. Показники порушення функції сечового міхура, як наслідок УСМ, до та після хірургічного лікування в групі порівняння.

Середня інтенсивність болю за NPRS (Numeric Pain Rating Scale) після

Середня інтенсивність спастики за шкалою Ashworth (Ashworth Scale) в балах становила 1,32 (95 % ДІ: 1,12 – 1,52) до хірургічного лікування і після

Середній рівень втрати чутливості в групі порівняння до операції за шкалою ISNCSCI в балах становив 0,35 (95 % ДІ: 0,15 – 0,56), в той час як після хірургічного лікування він був статистично значимо вищим – 1,29 (95 % ДІ 1,12 – 1,46), тобто відновлення чутливості відбувалося після лікування на 0,94 бали (Рис. 3.2).

Середній рівень порушення моторики в групі порівняння за шкалою ISNCSCI після операції покращився до 0,61 (95 % ДІ: 0,23 – 1) в балах, але не суттєво в порівнянні з середнім значенням до хірургічного лікування становив

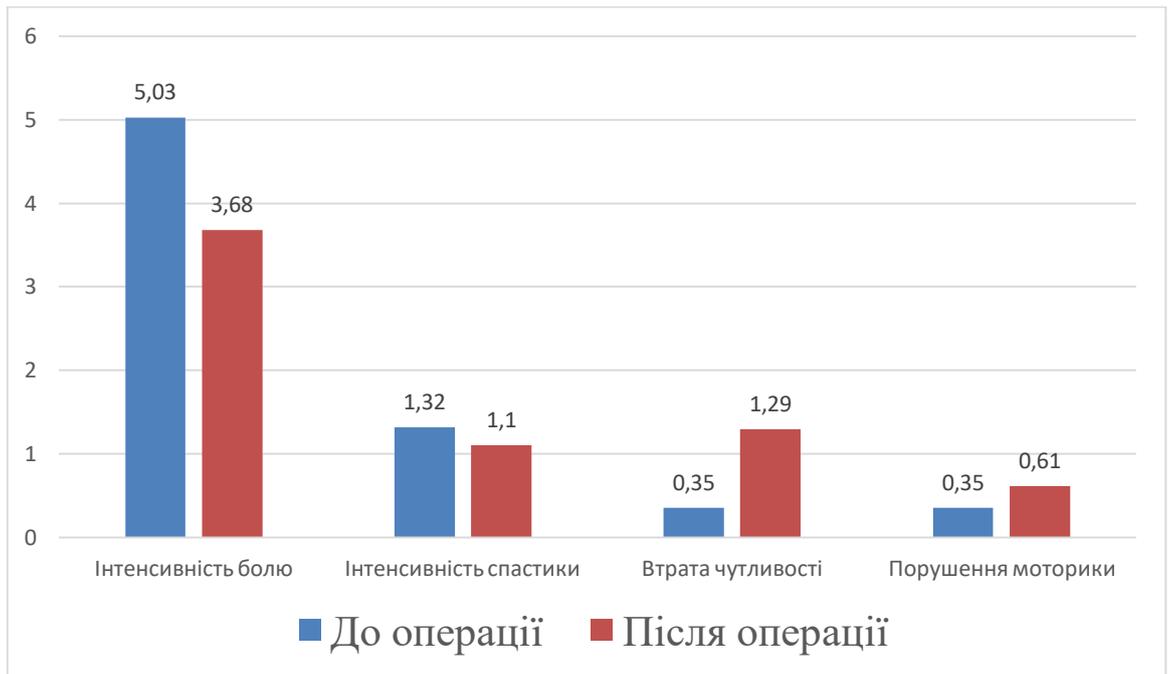


Рис. 3.2. Показники інтенсивності болю, спастики, втрати чутливості та порушення моторики до та після хірургічного лікування у пацієнтів в групі порівняння.

Таким чином в групі порівняння ми отримали позитивні результати лікування, які проявились в покращанні моторної та сенсорної функцій після їх втрати, різного ступеня, внаслідок травматичного ушкодження спинного мозку. Зменшилась інтенсивність больового синдрому суттєво та в незначній мірі зменшилась інтенсивність спастики, але не суттєво. Крім того у випадках порушення функції сечового міхура, яка була практично у всіх пацієнтів ми відмітили також ознаки позитивного впливу хірургічного лікування УСМ, що проявилось в зменшенні затримки сечовипускання та залишкового об'єму сечі. Усі ці дані звичайно мають вплив на якість життя пацієнтів та прояви інвалідизації їх [117]. Але можливість даного методу є обмеженою і тому все більше розглядають необхідність додавання додаткових хірургічних, електрофізіологічних методів, одним із яких є метод епідуральної електростимуляції спинного мозку.

Викладені у розділі 3 матеріали опубліковано у статті:

1. Nekhlopochyn, O., Vorodi, M., & Cheshuk, I. (2022). AOSpine Thoracolumbar Spine Injury Classification System in determining the treating tactics of thoracolumbar junction traumatic injuries (literature review). *TRAUMA*, 23(2), 68–78.

<https://doi.org/10.22141/1608-1706.2.23.2022.893>

#### **РОЗДІЛ 4**

### **АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ХІРУРГІЧНОГО ЛІКУВАННЯ УСКЛАДНЕНЬ ТРАВМИ СПИННОГО МОЗКУ В ДОСЛІДНІЙ ГРУПІ**

## (ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕЕС)

В дослідній групі всього було 65 пацієнтів віці 20–69 років, середній вік – 45.4 роки (табл.2.1.1), з них 11 жінок і 54 чоловіків. У чоловіків частіше відбуваються травматичні ушкодження спинного мозку.

Головною причиною травм були дорожно-транспортні пригоди (ДТП), падіння з висоти і в тому числі пірнання, а в останні роки це вогнепальні та мінно-вибухові ушкодження спинного мозку.

Локалізація ушкодження спинного мозку є суттєвим чинником, що визначає лікувальну тактику. За рівнем ушкодження (Таб. 4.1) хворих з наслідками травми шийного відділу спинного мозку (С3 – С8 сегменти) було 20 (31,2%), грудних сегментів (Th1 – Th12) – 44 (68,2%), поперекового відділу спинного мозку (L1) – 1 (1,6%).

**Таблиця 4.1**

Розподіл хворих за рівнем травми в дослідній групі.

Рівень травми	Дослідна група (кількість пацієнтів)
Шийний відділ	20 (0,31; 95% ДІ: 0,20 - 0,44)
Грудний відділ	44 (0,68; 95% ДІ: 0,55 - 0,79)
Поперековий відділ	1 (0,02; 95% ДІ: 0 - 0,09)
Всього	65

Мало було пацієнтів з локалізацією травми в поперековому та більш нижчих відділах. Це пов'язано з тим, що взагалі на цьому рівні травми зустрічаються рідше, а ушкодження сегментів там відбувається ще рідше, тому в були набрані пацієнти з ушкодженням шийного та грудного відділів хребта.

Час після ушкодження спинного мозку до хірургічного лікування коливався від 1 місяця до 8 років. В термін від 1 місяця до 1 року після травми було 26 пацієнтів (40 %), з 1 до 2 років – 21 (32 %) хворий, з 2 до 3 років – 6

(10 %) хворих, в термін з 3 до 4 років – 2 пацієнта (3 %) в дослідній групі хворих, в термін з 4 до 5 років після травми прооперовано було 4 пацієнта (6 %) дослідної групи, в термін з 5 до 6 років після травми прооперовано було 2 пацієнта (3 %) дослідної групи, в термін з 6 до 7 років після травми було 2 пацієнта (3 %) дослідної групи і в термін з 7 до 8 років після травми також було проліковано 2 пацієнта (3 %) дослідної групи.

Середній час після травми до хірургічного лікування в місяцях становив 29,08 (95 % ДІ: 23,41 – 34,75). Не було пацієнтів, яким оперативне лікування було проведено в перші 24 години після травми.

Основними ускладненнями ушкодження спинного мозку в пацієнтів контрольної групи були: затримка або нетримання сечі, наявність залишкової сечі, больовий синдром, спастичний синдром порушення сенсорної та моторної сфери.

За шкалою ASIA оцінювали ступінь рухового та чутливого дефіциту, інтенсивність болю в балах оцінювали за шкалою NPRS (Numeric Pain Rating Scale), інтенсивність спастики оцінювали за шкалою Ashworth (Ashworth Scale) в балах, затримку або нетримання сечі оцінювали по факту присутності, об'єм залишкової сечі в мілілітрах.

Затримка сечовипускання була у 47 (72 %) пацієнтів, а нетримання сечі констатували у 18 (28 %) пацієнтів цієї групи.

Інтенсивність болю за NPRS (Numeric Pain Rating Scale) становила в середньому 5,8 (95 % ДІ: 5,47 – 6,13) балів.

Середня інтенсивність спастики за шкалою Ashworth (Ashworth Scale) в балах становила 1,46 (95 % ДІ: 1,26 – 1,67).

Середній рівень порушення чутливості в групі порівняння за шкалою ISNCSCI в балах становив 0,38 (95 % ДІ: 0,25 – 0,52).

Середній рівень порушення моторики в групі за шкалою ISNCSCI в балах становив 0,6 (95 % ДІ: 0,36 – 0,84).

Основними видами оперативних утручань в дослідній групі були: декомпресивна інтерлямінектомія в залежності від рівня травми, дуру- або

мієлорадикулोलіз, та в окремих випадках транспедикулярна фіксація хребців [118], в залежності від рівня травми, і встановлення електродів для ЕЕС за розробленою методикою, що відрізняло пацієнтів даної групи від групи порівняння. Інколи це було повторне хірургічне лікування для встановлення електродів для ЕЕС, на першому етапі вже було проведено декомпресійне та стабілізуюче хірургічне втручання. Час хірургічного втручання, під час якого встановлювали електроди для ЕЕС, коливався від 1 місяця до 8 років.

Після оперативного втручання з встановленням електродів для проведення ЕЕС, та проведення сеансів ЕЕС, ступінь проявів ушкоджень спинного мозку суттєво зменшився, і ефект був більш виражений ніж в групі порівняння.

Затримка сечовипускання була у 14 (21,5 %) (до операції у 47 (72 %)) пацієнтів, зменшилась на 33 пацієнта або в 3,36 разів. Нетримання сечі констатували у 39 (60 %) (до операції у 18 (28 %)) пацієнтів цієї групи, тобто збільшилась на 21 пацієнт. Перехід симптоматики від затримки до нетримання пацієнтами сприймається краще бо непотрібно випускати сечу катетером. Отже затримка сечовипускання є гіршим проявом даної групи порушень і тому позитивним є результат від оперативного лікування за даним типом порушень.

Крім того з'явилися пацієнти у яких відновилось нормальне сечовипускання, їх було 5 (7,7 %) та незначна дисфункція – 7 пацієнтів (10,8 %). Тобто у 18,5 % пацієнтів методика ЕЕС дозволяє відновити функціональний стан сечового міхура.

Відповідно середній об'єм залишкової сечі після оперативного

л  
і  
к  
у  
в  
а  
н  
н  
я

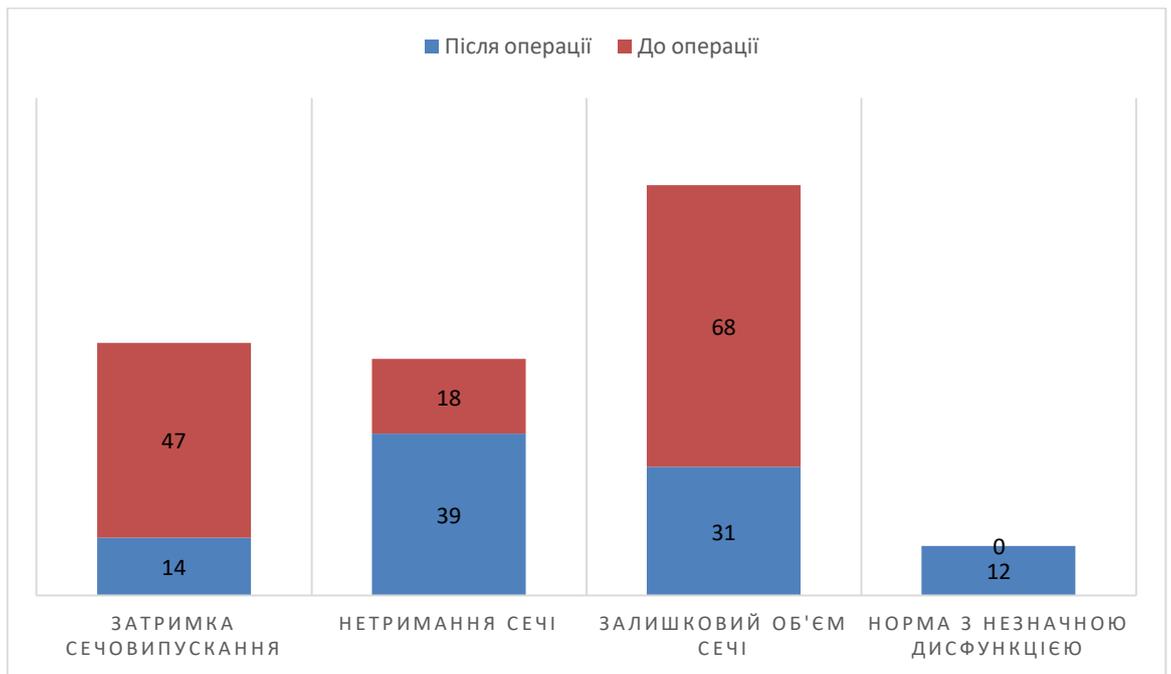


Рис.4.1. Показники порушення функції сечового міхура, як наслідок УСМ, до та після хірургічного лікування після проведення ЕЕС

Середня інтенсивність болю за NPRS (Numeric Pain Rating Scale) після

х

і

р

у

в

о

в

а

л

а

х

Середня інтенсивність спастики за шкалою Ashworth (Ashworth Scale) в балах становила 1,46 (95 % ДІ: 1,26 – 1,67) до проведення ЕЕС і після лікування

Середній рівень втрати чутливості (Рис. 4.2) в групі лікування з використанням ЕЕС (досліджувальна група) до операції за шкалою ISNCSCI в балах становив 0,38 (95 % ДІ: 0,25 - 0,52), в той час як після хірургічного лікування з проведенням ЕЕС він був статистично значимо вищим - 1,66 (95 % ДІ: 1,5 – 1,83), на 1,28 балів, статистично значимо ( $p=0,0048$ ) і більшим ніж в групі порівняння після лікування 1,29 (95 % ДІ 1,12 – 1,46), тобто відновлення чутливості відбувалося після лікування краще із додатковим використанням методики ЕЕС.

ї

к

ф

в

Середній рівень порушення моторики в дослідній групі за шкалою ISNCSCI після операції покращився до 2,02 (95 % ДІ: 1,69 – 2,34), на 1,42 бали ( $p < 0.05$ ) в порівнянні з середнім значенням до хірургічного лікування, яке було

0

,

6

(

9

5

%

Д

І

:

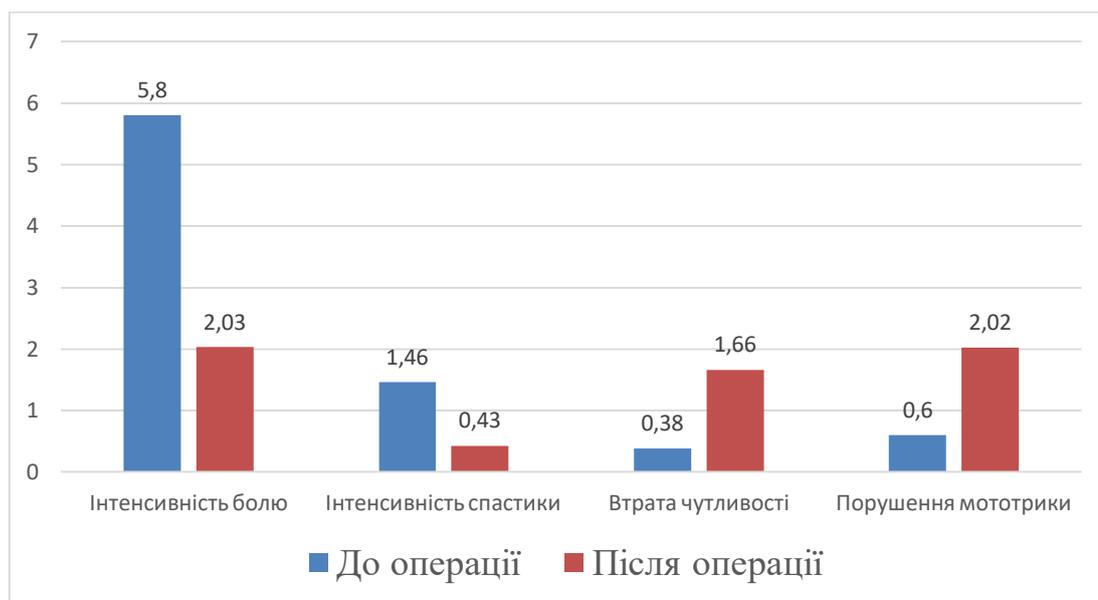


Рис. 4.2. Показники інтенсивності болю, спастики, втрати чутливості та порушення моторики до та після хірургічного лікування з використанням ЕЕС у пацієнтів дослідної групи

,

3

6

Таким чином результати застосування ЕЕС в складі традиційного хірургічного лікування УСМ показали суттєве відновлення ряду втрачених функцій. Особливо це видно по відновленню функції сечового міхура після проведення сеансів ЕЕС. У 18,5 % пацієнтів методика ЕЕС дозволяє відновити функціональний стан сечового міхура, суттєво зменшується кількість випадків затримки сечі і збільшення нетримання сечі, що є функціонально менш інвалідизуючим порушенням. Стосовно відновлення рухових функцій то після ЕЕС вона суттєво покращувалась, і окремі пацієнти починали повзати, сидіти, стояти, навіть ходити і їздити на автомобілі.

(Рис. 4.2) та значенням після операції в групі порівняння – 0,61 (95 % ДІ: 0,23 – 1).

Наводимо приклад клінічного випадку 1. Пацієнт В., 1 рік після травми шийного відділу хребта на рівні С6-С7. Травма виникла в наслідок пірнання в озері. Протягом першого місяця було проведено передню шийну корпектомію тіла хребця С6 з подальшим міжтіловим корпородезом. Одразу після травми, неврологічно була тетраплегія, через рік після травми пацієнт потрапив в ДУ ІНХ. При огляді пацієнта неврологічний статус був наступний: верхній проксимальний парапарез, дистальна плегія, нижня параплегія. Пацієнту було проведено хірургічне втручання: лямініектомія С6-С7, мієлорадикулотомія, встановлення 1-ї епідуральної системи стимуляції, інтерлямініектомія Th12–L1 – встановлення 2-ї електростимулюючої системи на нижньогрудний відділ спинного мозку. Через рік після проведеної нами операції за оригінальною методикою встановлення систем епідуральної електростимуляції, разом з реабілітаційним лікуванням, було відмічено суттєве покращання стану пацієнта. Неврологічна картина була наступною: верхній легкий парапарез (дистально та проксимально – 4 бали, з обох сторін) з боку нижніх кінцівок, сила м'язів становила 3 бали. (Рис. 4.3).



Рис. 4.3. Пацієнт В., після травми С5 та хірургічного лікування з імплантацією 2х систем для ЕЕС через 1 рік. Відновились рухи в руках, тулубі та не повністю в ногах

Всі параметри, які ми оцінювали, при аналізі результатів лікування УСМ методом ЕЕС мали позитивну динаміку: зменшувався суттєво больовий синдром, зменшувалась суттєво спастичність, зменшувався моторний та сенсорний дефіцит і відновлювались значимо втрачена чутливість і рухові дії.

Залишилось встановити наскільки є кращим використання ЕЕС в складі традиційного хірургічного лікування наслідків УСМ в порівнянні з лише хірургічним.

Оскільки нами окремо було виділено Досліджувану групу (а), в якій був, як і в групі порівняння, 31 пацієнт і у яких давність травми до хірургічного лікування становила до 2 років, то ми провели аналіз результатів і в цій підгрупі основної досліджуваної групи.

Затримка сечовипускання була у 21 (67,7 %) пацієнтів, а нетримання сечі констатували у 10 (32,3 %) пацієнтів цієї групи.

Інтенсивність болю за NPRS (Numeric Pain Rating Scale) становила в середньому 5,84 (95 % ДІ: 5,29 – 6,39) балів.

Середня інтенсивність спастики за шкалою Ashworth (Ashworth Scale) в балах становила 1,58 (95 % ДІ: 1,22 – 1,94).

Середній рівень порушення чутливості в групі порівняння за шкалою ISNCSCI в балах становив 0,42 (95 % ДІ: 0,24 – 0,6).

Середній рівень порушення моторики в групі за шкалою ISNCSCI в балах становив 0,48 (95 % ДІ: 0,17 – 0,8).

Хірургічне лікування тут також включало: декомпресивні інтерлямінектомії в залежності від рівня травми, дуру- або мієлорадикулоріз, фіксацію хребта та встановлення системи для епідуральної електростимуляції.

Після хірургічного лікування та проведення сеансів ЕЕС була відмічена суттєва позитивна динаміка. Затримка сечовипускання була лише у 3 (9,7 %) (до операції у 21 (67,7 %)) пацієнтів, зменшилась на 18 пацієнта або в 7 разів. Нетримання сечі констатували у 21 (67,7 %) (до операції у 10 (32,3 %)) пацієнтів цієї групи, тобто збільшилась на 11 пацієнтів. Ми вже зазначали, що

перехід симптоматики від затримки до нетримання сечі пацієнтами сприймається краще.

З'явилися також пацієнти у яких відновилось нормальне сечовипускання, їх було 3 (9,7 %) та незначна дисфункція – 4 пацієнтів (12,9 %). Тобто у 22,6 % пацієнтів методика ЕЕС дозволяє відновити функціональний стан сечового міхура.

Відповідно середній об'єм залишкової сечі після оперативного

л  
і  
к  
у  
в  
а  
н  
н  
я  
н  
а  
с  
л  
і

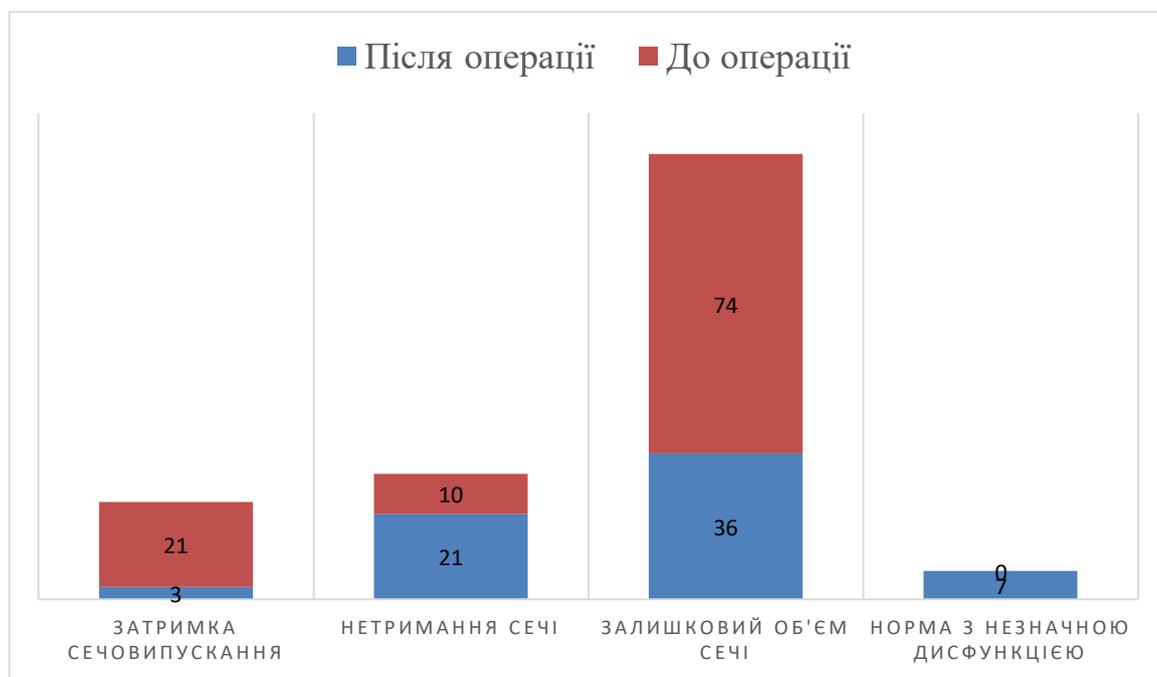


Рис. 4.4. Показники порушення функції сечового міхура, як наслідок УСМ, до та після хірургічного лікування після проведення ЕЕС в Дослідній групі (а)

в

у Середня інтенсивність болю за NPRS (Numeric Pain Rating Scale) після

Є  
М  
р  
з  
р

Середня інтенсивність спастики за шкалою Ashworth (Ashworth Scale) в балах становила 1,58 (95 % ДІ: 1,22 – 1,94) до проведення ЕЕС в Дослідній (а)

г

р Середній рівень втрати чутливості (Рис. 4.5) в групі лікування з використанням ЕЕС (досліджувальна (а) група) до операції за шкалою ISNCSCI в балах становив 0,42 (95 % ДІ: 0,24 – 0,6), в той час як після хірургічного лікування з проведенням ЕЕС він був статистично значимо вищим – 1,77 (95 % ДІ: 1,57 – 1,98), на 1,35 балів, статистично значимо ( $p=0,0007$ ) і більшим ніж в групі порівняння після лікування 1,29 (95 % ДІ 1,12 – 1,46), тобто відновлення чутливості відбувалося після лікування краще із додатковим використанням методики ЕЕС і чим раніше після травми тим кращим було відновлення.

с Середній рівень порушення моторики в дослідній групі за шкалою ISNCSCI після операції покращився до 2,19 (95 % ДІ: 1,75 – 2,64), на 1,71 бали ( $p<0.05$ ) в порівнянні з середнім значенням до хірургічного лікування, яке було

0

д

4

8

у

6

9

н

н

0

д

н

а

н

а

0

с

4

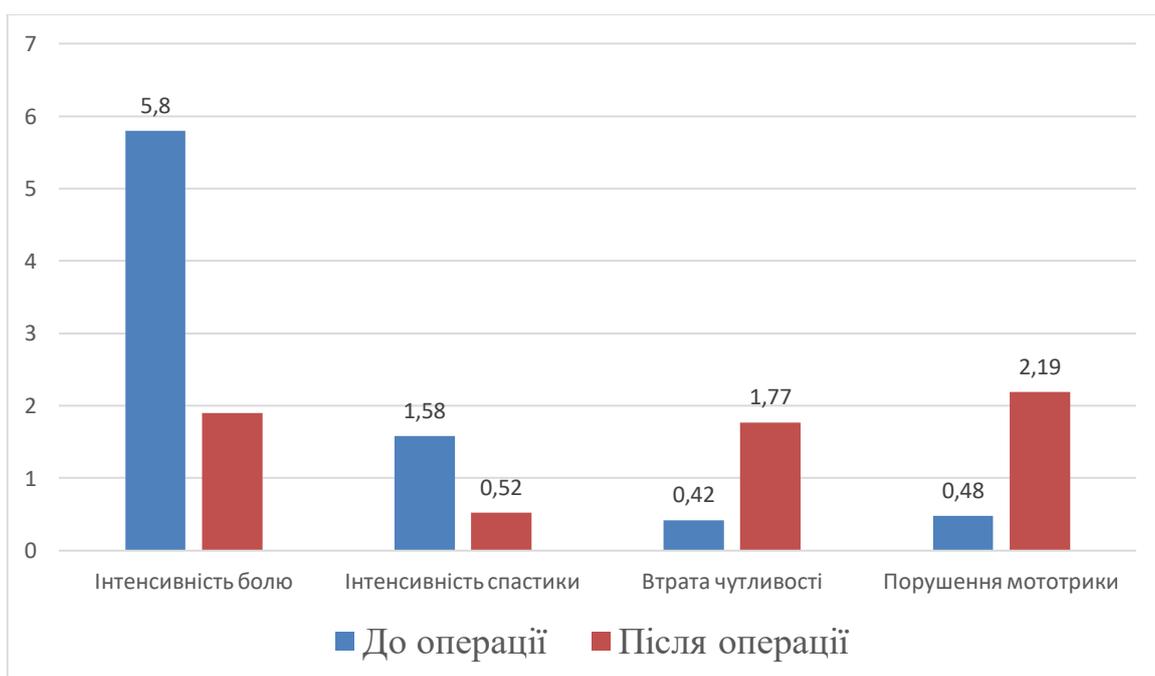


Рис. 4.5. Показники інтенсивності болю, спастики, втрати чутливості та порушення моторики до та після хірургічного лікування з використанням ЕЕС у пацієнтів Дослідної (а) групи.

Таким чином результати в дослідній (а) групі після лікування з використанням ЕЕС очікувано були кращими ніж в загальній дослідній групі, і це свідчить про необхідність використання методики вже на ранніх стадіях після травми.

Викладені у розділі 4 результати опубліковано у статті:

1. Nekhlopochyn, O., Cheshuk, Y., Vorodi, M., Tsymbaliuk, Y., Karpinskyi, M., & Yaresko, O. (2022). Biomechanical State of the Operated Thoracolumbar Junction in Lateroflexion. *TERRA ORTHOPAEDICA*, (2(113), 58-67. <https://doi.org/10.37647/0132-2486-2022-113-2-58-67>

**РОЗДІЛ 5**

**ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ХІРУРГІЧНОГО ЛІКУВАННЯ**

**УСКЛАДНЕНЬ ТРАВМИ СПИННОГО МОЗКУ В ДОСЛІДНІЙ ГРУПІ**

**ТА ГРУПІ ПОРІВНЯННЯ**

З метою оцінки ефективності ЕЕС спинного мозку провели порівняльний аналіз результатів хірургічного лікування наслідків УСМ (група порівняння) з результатами в дослідній групі (хірургічне лікування з додатковою ЕЕС спинного мозку). В дослідній групі було 65 пацієнтів віці 20-69 років, середній вік – 45.4 роки (табл. 5.1) , з них 11 жінок і 54 чоловіків, а в групі порівняння були пацієнти у віці 24-60 років, середній вік – 41.9 років (табл. 5.1), всього 31 пацієнтка, з них 11 жінок і 20 чоловіків. Всього 96 пацієнтів, в співвідношенні 2:1 дослідної та порівняльної груп. У чоловіків частіше відбуваються травматичні ушкодження спинного мозку в 2-3 рази.

Таблиця 5.1

Розподіл пацієнтів за статтю та віком в дослідній та контрольній групах

Показник	Група з ЕЕС (n = 65)	Група порівняння (n = 31)	P
Стать			0,7006 <sup>1</sup>
Чоловіки	54 (0,83; 95 %ДІ: 0,71 – 0,91)	24 (0,77; 95 %ДІ: 0,58 – 0,9)	

Жінки	11 (0,17; 95 %ДІ: 0,09 – 0,29)	7 (0,23; 95 %ДІ: 0,1 – 0,42)	
Вік, років	41,91 (95 % ДІ: 38,92 – 44,9)	45,26 (95 % ДІ: 41,61–48,91)	0,1523 <sup>2</sup>

<sup>1</sup> - Тест хі-квадрат Пірсона з поправкою на неперервність Йейтса

<sup>2</sup> - Тест Вілкоксона на суму рангів з поправкою на неперервність

Як видно із даних та довірчих інтервалів, не було статистично значимих відмінностей за статтю та віком в групах. Групи були однорідними за цими параметрами. Причинами травм були дорожньо-транспортні пригоди (ДТП), падіння з висоти і в тому числі пірнання, а в останні роки (з часу повномасштабного вторгнення росії) це вогнепальні та мінно-вибухові ушкодження спинного мозку [119].

За рівнем ушкодження в дослідній групі було 20 (31,2 %) пацієнтів з наслідками травми шийного відділу спинного мозку (С3 – С8 сегменти), та 47 пацієнтів з ураженням грудних сегментів (Th1 – Th12) – 68,2 %, поперекового відділу спинного мозку (L1) – 1 (1,6 %). В групі порівняння, як видно з таблиці 5.2, було 7 пацієнтів (22,6 %) з наслідками травми шийного відділу спинного мозку (С3 – С8 сегменти), та 24 пацієнти з ураженням грудних сегментів (Th1 – Th12) – 77,4 %.

Таблиця 5.2

Розподіл хворих за рівнем травми в дослідній та порівняльних групах

Рівень травми	Дослідна група (кількість пацієнтів)	Група порівняння
Шийний відділ	20 (0,31; 95 % ДІ: 0,20 – 0,44)	7 (0,226; 95 % ДІ: 0,1 – 0,42)
Грудний відділ	44 (0,68; 95 % ДІ: 0,55 – 0,79)	24 (0,774; 95% ДІ: 0,5 – 0,9)
Поперековий відділ	1 (0,02; 95 % ДІ: 0 – 0,09)	0 (0; 95% ДІ: 0 – 0,14)
Всього	65	31

Як видно із даних та довірчих інтервалів, не було статистично значимих відмінностей за рівнем травми в групах.

Мало було пацієнтів з локалізацією травми в поперековому та більш нижчих відділах. В дослідній групі був лише 1 пацієнт. Як відомо, на цьому рівні, травми зустрічаються рідше, а ушкодження сегментів там практично не відбувається, тому в основному були набрані пацієнти з ушкодженням шийного та грудного відділів хребта.

Час після травми спинного мозку до хірургічного лікування в групі порівняння коливався від 1 місяця до 2 років, а в дослідній групі він був довшим – від 1 місяця до 8 років. В термін від 1 місяця до 1 року після травми було 55 пацієнтів (57,3%) хворих (29 групі порівняння та 26 в дослідній групі), з 1 до 2 років – 22 (22,9%) хворих (1 в групі порівняння та 21 в дослідній групі), з 2 до 3 років – 7 (7,3%) хворих (1 в групі порівняння та 6 в дослідній групі), в термін з 3 до 4 років – 2 пацієнта (2,2%) в дослідній групі хворих, в термін з 4 до 5 років після травми прооперовано було 4 пацієнта (4,16%) дослідної групи, в термін з 5 до 6 років після травми прооперовано було 2 пацієнта (2,2%) дослідної групи, в термін з 6 до 7 років після травми було 2 пацієнта (2,2%) дослідної групи і в термін з 7 до 8 років після травми було проліковано 2 пацієнта (2,2%) дослідної групи.

Середній час після травми до хірургічного лікування в місяцях статистично відрізнявся і був більшим в дослідній групі (Табл. 5.3). Не було

пацієнтів, яким оперативне лікування було проведено в перші 24 години після травми.

Таблиця 5.3

Середній час після травми до хірургічного лікування в обох групах

Показник	Дослідна група	Група порівняння	P
Час від травми до операції, міс	29,08 (95% ДІ: 23,41 - 34,75)	12,29 (95% ДІ: 10,2 - 14,38)	<0,0001 <sup>1</sup>

<sup>1</sup> - Тест Вілкоксона на суму рангів з поправкою на неперервність

Отже, із таблиці видно, що в дослідній групі були пацієнти з більш давніми травмами, і тому такі пацієнти є складнішими і мають більший спектр наслідків УСМ.

З метою рівномірного розподілу в групах та додаткової оцінки результатів лікування з урахуванням давності травми в досліджуваній групі ми виділили підгрупу – досліджувана група (а), в якій був, як і в групі порівняння 31 пацієнт, і у яких давність травми до хірургічного лікування становила до 2 років. Порівняльний аналіз результатів лікування в дослідній групі (а) буде надано в другій половині цього розділу.

Основними ускладненнями ушкодження спинного мозку в пацієнтів обох груп були: затримка або нетримання сечі, наявність залишкової сечі, больовий синдром, спастичний синдром порушення сенсорної та моторної сфери.

За шкалою ASIA оцінювали ступінь рухового та чутливого дефіциту, інтенсивність болю в балах оцінювали за шкалою NPRS (Numeric Pain Rating Scale), інтенсивність спастики оцінювали за шкалою Ashworth (Ashworth Scale) в балах, затримку або нетримання сечі оцінювали по факту присутності, об'єм залишкової сечі в мілілітрах.

Таблиця 5.4

Показники порушення сечовиділення, ступеня болю, спастики,  
відхилення чутливої та моторної сфери в дослідній та порівняльній групах  
до операції

Показник	Дослідна група
Затримка сечі	47 (0,72; 95 % ДІ: 0,7 – 0,82)
Нетримання сечі	ДІ: 0,18 – 0,40)
Об'єм залишкових сечі, мл	68,15 (95 % ДІ: 61,03 – 75,28)
Ступінь болю (NRS), бали	5,8 (95 % ДІ: 5,47 – 6,13)
Ступінь	1,46 (95% ДІ: 1,26 - 1,67)

спаст ики (Ash worth Scale ) ), бали	
Пору ченн я чутли вості  (ISN CSCI ) ), бали	0,38 (95% ДІ: 0,25 - 0,52)
Пору шенн я мото рики (ISN CSCI ) ), бали	0,6 (95% ДІ: 0,36 - 0,84)

<sup>1</sup> – Тест хі-квадрат Пірсона з поправкою на неперервність Йейтса;

<sup>2</sup> – Тест Вілкоксона на суму рангів з поправкою на неперервність;

<sup>3</sup> – Тест Вілкоксона на суму рангів.

За показниками затримки або нетримання сечі, ступенями спастичності, порушення сенсорної та моторної сфери, пацієнти в обох групах статистично не відрізнялися. Більшою був середній об'єм залишкової сечі в контрольній групі, а больовий синдром був вірогідно більшим в дослідній групі (Табл. 5.4). Такі окремі розбіжності на наш погляд суттєво не впливають на якість проведеного дослідження.

Основними видами оперативних втручань в дослідній групі були: декомпресивна інтерлямінектомія в залежності від рівня травми, дуру- або мієлорадикулोलіз, та в окремих випадках транспедикулярна фіксація хребців, в залежності від рівня травми і встановлення електродів для ЕЕС за розробленою методикою, а в групі порівняння хірургічне лікування не включало встановлення системи для ЕЕС, що було відмінним. Інколи в дослідній групі це було повторне хірургічне лікування для встановлення електродів для ЕЕС, а на першому етапі вже було проведено декомпресійне та стабілізуюче хірургічне втручання. В 5-и випадках в дослідній групі при травмі на рівні шийного відділу встановлювали дві системи ЕЕС (на регіон шийного та поперекового потовщень спинного мозку), і проводили сеанси епідуральної електростимуляції на дві ділянки спинного мозку. Така методика давала кращі результати у випадку ушкодження шийних сегментів спинного мозку.

Після оперативного втручання з встановленням електродів для проведення ЕЕС, та проведення сеансів ЕЕС, ступінь проявів ушкоджень спинного мозку суттєво зменшився, і ефект був більш виражений ніж в групі порівняння.

Таблиця 5.5

Показники порушення сечовиділення  
в дослідній та контрольній групах після операції

Показник	Дослідна група	Група порівняння	Р
----------	----------------	------------------	---

	(n = 65)	(n = 31)	
Затримка сечі	ДІ: 0,13 – 0,34)	ДІ: 0,45 – 0,8	0,0002 <sup>1</sup>
Нетримання сечі	ДІ: 0,47 – 0,72)	ДІ: 0,2 – 0,55)	
Дисфункція	ДІ: 0,05 – 0,22)	ДІ: 0 – 0,14)	
Норма	ДІ: 0,03 – 0,18	ДІ: 0 – 0,14)	
Об'єм залишкової сечі, мл	ДІ: 26,36 – 37,48)	ДІ: 67,94 – 86,57)	<0,0001 <sup>2</sup>

<sup>1</sup> – Точний тест Фішера;

<sup>2</sup> – Тест Вілкоксона на суму рангів з поправкою на неперервність.

Статистично значимо зменшилась затримка сечовипускання в дослідній групі відповідно до даних в групі порівняння і навпаки збільшились кількість нетримання сечі в дослідній групі (Табл. 5.5). Затримка сечовипускання є гіршим проявом від нетримання і тому позитивним є результат від лікування за допомогою ЕЕС за даним типом порушень. В дослідній групі з'явилися пацієнти у яких відновилось нормальне сечовипускання, їх було 5 (7,7 %) та незначна дисфункція – 7 пацієнтів (10,8 %). Тобто у 18,5 % пацієнтів методика ЕЕС дозволяє майже повністю відновити функціональний стан сечового міхура.

Відповідно середній об'єм залишкової сечі після оперативного лікування наслідків УСМ з використанням ЕЕС статистично значимо був

м  
е  
н  
ш  
и  
м  
  
н  
і  
ж

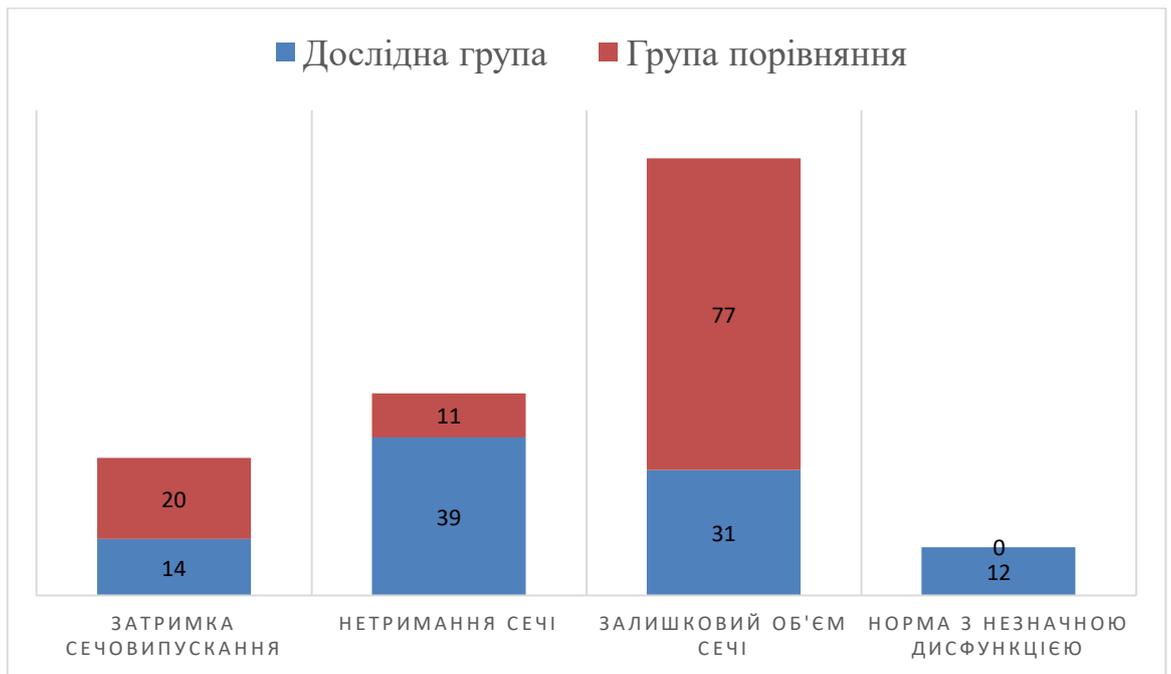


Рис.5.1. Показники порушення функції сечового міхура, як наслідок УСМ, після хірургічного лікування в дослідній та контрольній групах

Середня інтенсивність болю за NPRS (Numeric Pain Rating Scale) після

х  
і  
р  
у  
р  
г  
і  
ч  
н

Таблиця 5.6

Показники ступеня болю, спастики, відхилення чутливої та моторної сфери в дослідній та порівняльній групах після лікування

Показник	Дослідна група (n = 65)	Група порівняння (n = 31)	P
Ступінь болю (NPRS), бали	Ді: 1,82 – 2,24)	Ді: 3,31 – 4,05)	<0,0001 <sup>1</sup>
Ступінь спастики			<0,0001 <sup>1</sup>

к  
у  
в

(Ashworth Scale), бали	ДІ: 0,28 – 0,58)	ДІ: 0,88 – 1,32)	
Порушення чутливості (ISNCSCI), бали	1,66 (95 % ДІ: 1,5 – 1,83)	1,29 (95% ДІ: 1,12 – 1,46)	0,0048 <sup>1</sup>
Порушення моторики (ISNCSCI), бали	2,02 (95 % ДІ: 1,69 – 2,34)	0,61 (95% ДІ: 0,23 – 1)	<0,0001 <sup>1</sup>

<sup>1</sup> - Тест Вілкоксона на суму рангів

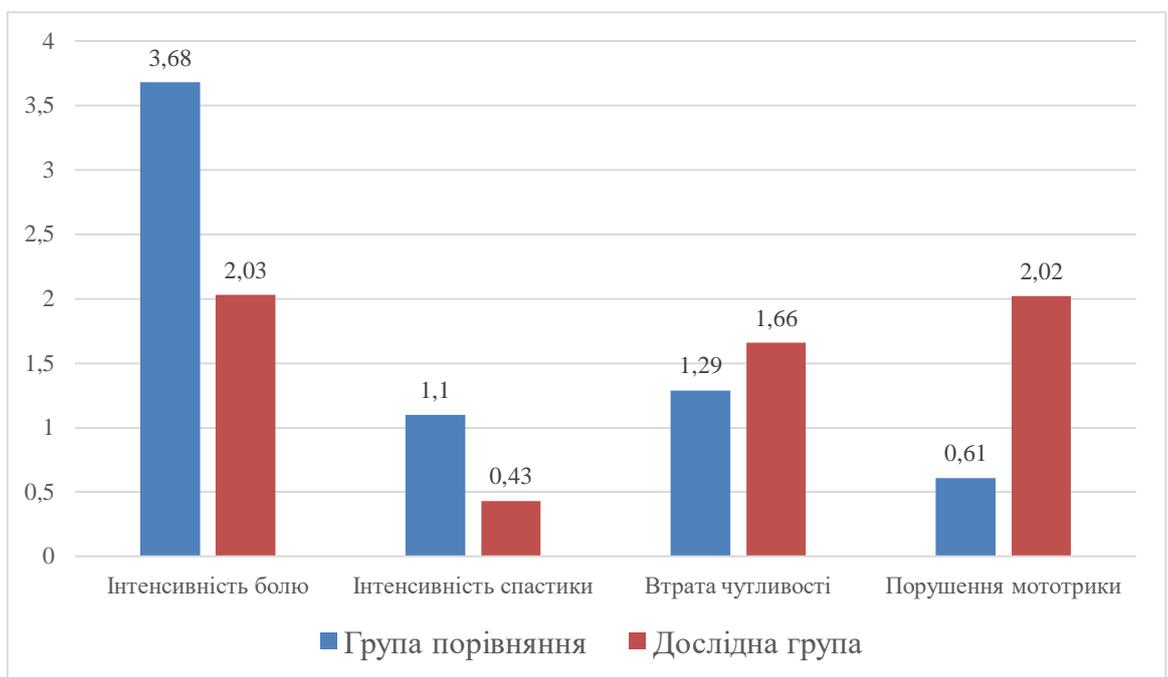


Рис. 5.2. Показники інтенсивності болю, спастики, втрати чутливості та порушення моторики після хірургічного лікування з використанням ЕЕС та без у пацієнтів дослідної і порівняльної груп.

Таким чином результати застосування ЕЕС в складі традиційного хірургічного лікування УСМ показали суттєву перевагу у відновленні ряду втрачених функцій в порівнянні з лікуванням без використання ЕЕС. Особливо це видно по відновленню функції сечового міхура після проведення сеансів ЕЕС. У 18,5 % пацієнтів методика ЕЕС дозволяє відновити функціональний стан сечового міхура, суттєво зменшується кількість випадків

затримки сечі і збільшення нетримання сечі, що є функціонально менш інвалідизуючим порушенням.

Всі параметри, які ми оцінювали, при аналізі результатів лікування УСМ методом ЕЕС мали кращі результати ніж в контрольній групі. Статистично значимо зменшувався больовий синдром ( $p < 0,0001$ ), він був на 45 % менший ніж в групі порівняння, зменшувалась суттєво і статистично значимо спастичність ( $p < 0,0001$ ), вона була 2,6 разів меншою ніж в групі порівняння. Дуже суттєво в 3,3 рази і статистично значимо ( $p < 0,0001$ ) відновлювалась моторика в порівнянні з контрольною групою. Після проведення сеансів ЕЕС з часом, через 3-6 місяців відновлювались рухи в кінцівках, тулубі, підвищувалась сила м'язів. В кожному конкретному випадку це залежало від тривалості комплексу реабілітаційних заходів та важкості травми УСМ.

Сенсорний дефіцит зменшувався, відновлення чутливості після проведення ЕЕС в дослідній групі статистично значимо ( $p < 0,048$ ) була ефективнішою ніж в групі порівняння.

Далі ми наведемо порівняльний аналіз результатів лікування наслідків ушкодження спинного мозку в дослідній (а) групі та групі порівняння. Як видно з таблиці 5.7.

Таблиця 5.7

Середній час після травми до хірургічного лікування в обох групах

Показник	Дослідна (а) група (n = 31)	Група порівняння (n = 31)	P
----------	-----------------------------	---------------------------	---

Час від травми до операції, міс	13,74 (95% ДІ: 12,22 - 15,27)	12,29 (95% ДІ: 10,2 - 14,38)	0,0713 <sup>1</sup>
---------------------------------	-------------------------------	------------------------------	---------------------

<sup>1</sup> – Тест Вілкоксона на суму рангів з поправкою на неперервність

Групи є однорідними, відмінностей нема. Основними ускладненнями ушкодження спинного мозку в пацієнтів обох груп були: затримка або нетримання сечі, наявність залишкової сечі, больовий синдром, спастичний синдром порушення сенсорної та моторної сфери. До операції ці ускладнення наведені в таблиці 5.8. Як видно з таблиці показники суттєво не відрізнялись в групах за виключенням ступеня больового синдрому та ступеня спастики, вони були гіршими в дослідній (а) групі.

Таблиця 5.8.

Показники порушення сечовиділення, ступеня болю, спастики, відхилення чутливої та моторної сфери в дослідній (а) та порівняльній групах до операції

Показник	Дослідна (а) група (n = 31)
Затримка сечі	21 (0,677; 95 % ДІ: 0,485 – 0,827)
Нетримання сечі	ДІ: 0,173 – 0,515)
Об'єм зали	74,35 (95% ДІ: 62,51 – 86,2)

ШКОВ ої сечі, мл	
Ступінь болю (NPRS), бали	5,84 (95 % ДІ: 5,29 – 6,39)
Ступінь спастики (Ashworth Scale), бали	1,58 (95 % ДІ: 1,22 – 1,94)
Поручення чутливості  (ISN CSCI), бали	0,42 (95 % ДІ: 0,24 – 0,6)

Порушення моторики (ISN CSCI), бали	0,48 (95 % ДІ: 0,17 – 0,8)
-------------------------------------	----------------------------

<sup>1</sup> - Тест хі-квадрат Пірсона з поправкою на неперервність Йейтса;

<sup>2</sup> - Тест Вілкоксона на суму рангів з поправкою на неперервність;

<sup>3</sup> - Тест Вілкоксона на суму рангів

Оперативні втручання в дослідній (а) групі були такі ж як і в основній групі та групі порівняння: декомпресивна інтерлямінектомія в залежності від рівня травми, дуру- або мієлорадикулоліз, та в окремих випадках транспедикулярна фіксація хребців, лише встановлення електродів для ЕЕС за розробленою методикою, відрізняло від групи порівняння.

Після оперативного втручання з встановленням електродів для проведення ЕЕС, та проведення сеансів ЕЕС одночасно з всіма іншими реабілітаційними заходами, ступінь проявів ушкоджень спинного мозку суттєво зменшився, і ефект був більш виражений в дослідній (а) групі ніж в групі порівняння (Табл.5.9).

Таблиця 5.9

Показники порушення сечовиділення в дослідній (а) та контрольній групах після операції

Показник	Дослідна (а) група (n = 31)	Група порівняння (n = 31)	P
Затримка сечі			0,0002 <sup>1</sup>

Нетримання сечі	ДІ: 0,03 – 0,27)	ДІ: 0,45 – 0,8	
Дисфункція	ДІ: 0,49 – 0,83)	ДІ: 0,2 – 0,55)	
Норма	ДІ: 0,04 – 0,31)	ДІ: 0 – 0,14)	
	ДІ: 0,03 – 0,27)	ДІ: 0 – 0,14)	
Об'єм залишкової сечі, мл	Д	ДІ: 67,94 – 86,57)	<0,0001 <sup>2</sup>

<sup>1</sup> – Точний тест Фішера;

<sup>2</sup> – Тест Вілкоксона на суму рангів з поправкою на неперервність

Статистично значимо зменшилась затримка сечовипускання в дослідній (а) групі відповідно до даних в групі порівняння і навпаки збільшились кількість нетримання сечі в дослідній групі (Табл. 5.9). В дослідній (а) групі з'явилися пацієнти у яких відновилось нормальне сечовипускання, їх було 3 (9,7 %) та незначна дисфункція – 4 пацієнтів (12,9 %). Тобто у 22,6 % пацієнтів методика ЕЕС дозволяє майже повністю відновити функціональний стан сечового міхура.

Відповідно середній об'єм залишкової сечі після оперативного лікування наслідків УСМ з використанням ЕЕС статистично значимо був

м

е

н

ш

и

м

н

і

ж

в

г

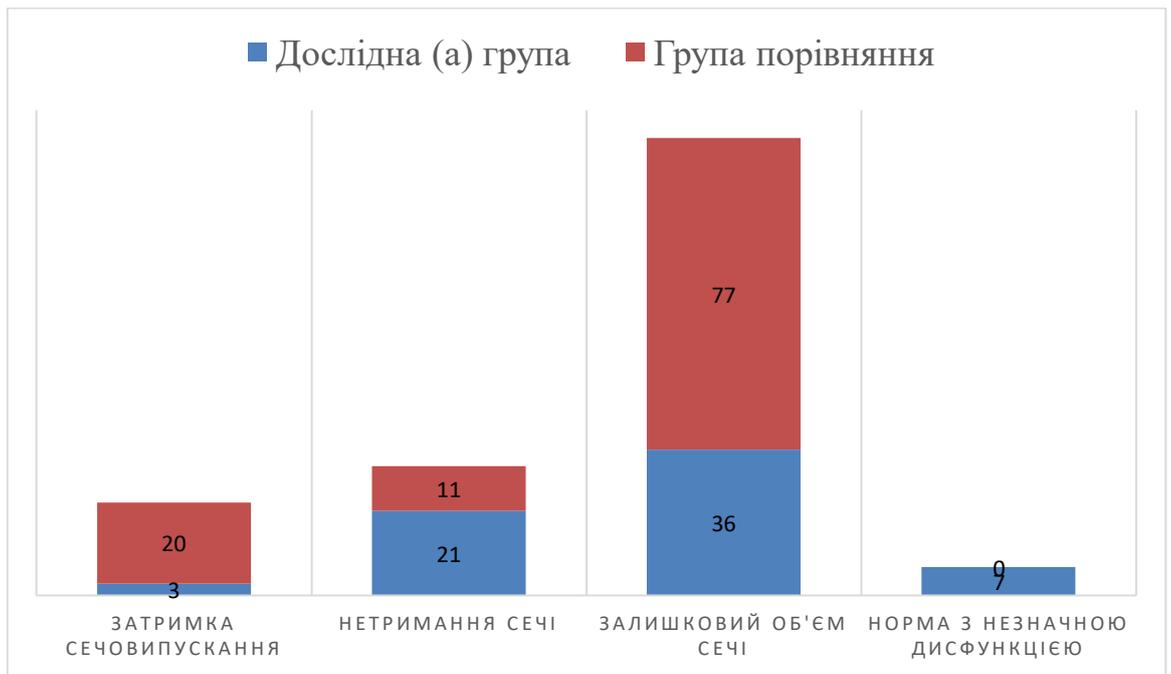


Рис.5.3. Показники порушення функції сечового міхура, як наслідок УСМ, після хірургічного лікування в дослідній (а) та контрольній групах.

Середня інтенсивність болю за NPRS (Numeric Pain Rating Scale) після

х  
і  
р  
у  
р  
г  
і  
ч  
н  
о  
г  
о  
л  
і  
к  
у  
в

Показники ступеня болю, спастики, відхилення чутливої та моторної сфери в дослідній та порівняльній групах після лікування

Показник	Дослідна група (n = 31)	Група порівняння (n = 31)	P
Ступінь болю (NPRS), бали	Ді: 1,67 – 2,2)	Ді: 3,31 – 4,05)	<0,0001 <sup>1</sup>
Ступінь спастики (Ashworth Scale), бали	Ді: 0,25 – 0,78)	Ді: 0,88 – 1,32)	<0,0001 <sup>1</sup>
Поручення чутливості (ISNCSCI), бали	1,77 (95 % Ді: 1,57 – 1,98)	1,29 (95 % Ді: 1,12 – 1,46)	0,0048 <sup>1</sup>
Порушення моторики (ISNCSCI), бали	2,19 (95 % Ді: 1,75 – 2,64)	0,61 (95 % Ді: 0,23 – 1)	<0,0001 <sup>1</sup>

<sup>1</sup> – Тест Вілкоксона на суму рангів

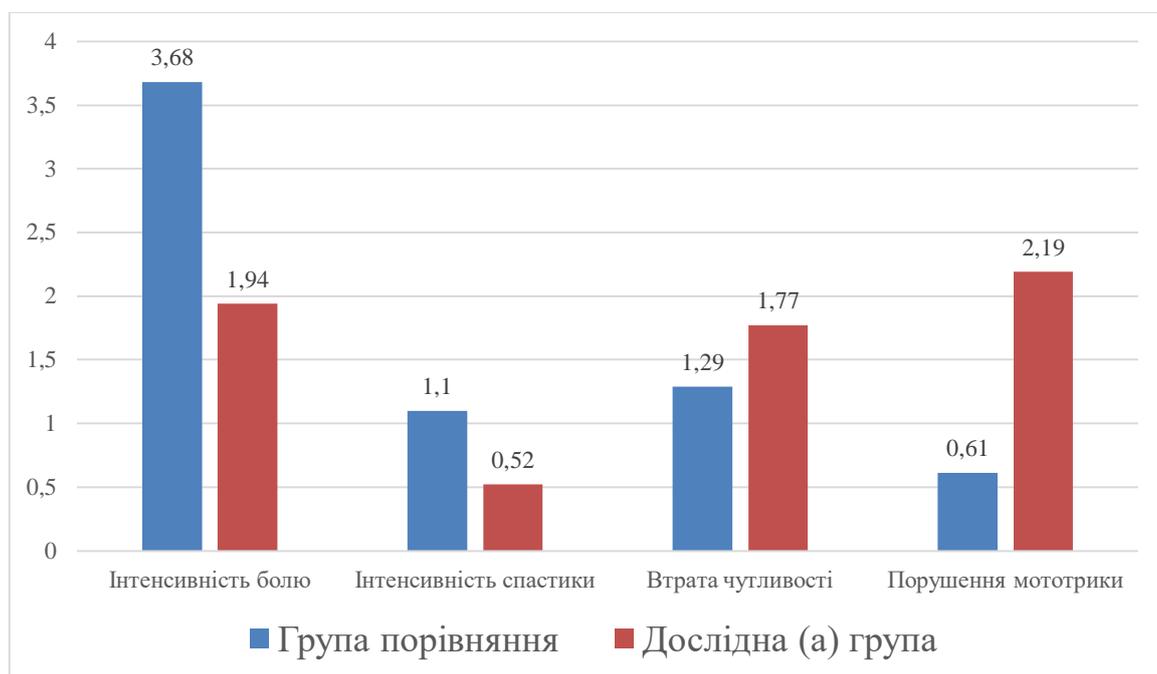


Рис. 5.4. Показники інтенсивності болю, спастики, втрати чутливості та порушення моторики після хірургічного лікування з використанням ЕЕС та без у пацієнтів дослідної (а) і порівняльної груп

Всі показники покращувалися суттєво і статистично значимо, достовірно в порівнянні з початковим рівнем та групою порівняння.

Таким чином, результати застосування ЕЕС в складі традиційного хірургічного лікування УСМ показали суттєву перевагу у відновленні ряду втрачених функцій в порівнянні з лікуванням без використання ЕЕС. Особливо це видно по відновленню функції сечового міхура після проведення сеансів ЕЕС. У 22,6 % пацієнтів методика ЕЕС дозволяє відновити функціональний стан сечового міхура, суттєво зменшується кількість випадків затримки сечі і збільшення нетримання сечі, що є функціонально менш інвалідизуючим порушенням.

Всі параметри, які ми оцінювали, при аналізі результатів лікування УСМ методом ЕЕС мали кращі результати ніж в контрольній групі. Статистично значимо зменшувався больовий синдром ( $p < 0,0001$ ), він був майже в 2 рази (1,89) менший ніж в групі порівняння, зменшувалась суттєво і статистично значимо спастичність ( $p < 0,0001$ ), вона була 2,11 разів меншою ніж в групі порівняння. Дуже суттєво в 3,6 рази і статистично значимо ( $p < 0,0001$ ) відновлювалась моторика в порівнянні з контрольною групою. Після проведення сеансів ЕЕС з часом, через 3-6 місяців відновлювались рухи в кінцівках, тулубі, підвищувалась сила м'язів. В кожному конкретному випадку це залежало від тривалості комплексу реабілітаційних заходів та важкості травми УСМ.

Сенсорний дефіцит зменшувався, відновлення чутливості після проведення ЕЕС в дослідній (а) групі статистично значимо ( $p = 0,0007$ ) була більшою ніж в групі порівняння. Всі показники в дослідній (а) групі статистично значимо покращувались на відміну від групи порівняння, як видно з таблиці 5.11.

Порівняння до і після операції р-значення в дослідній (а) та порівняльній групах

Показник	Дослідна (а) група (n = 31)	Група порівняння (n = 31)
Затримка сечі	0.0003139	0.4013
Об'єм залишкової сечі, мл	<0,0001	0.007402
Ступінь болю (NPRS), бали	<0,0001	<0,0001
Ступінь спастики (Ashworth Scale), бали	<0,0001	<0,0001
Поручення чутливості (ISNCSCI), бали	<0,0001	<0,0001
Порушення моторики (ISNCSCI), бали	<0,0001	0.1234

Таким чином методика ЕЕС показала свою ефективність як в строки до 2 років після травми, так і в більш пізні строки (до 8 років), тільки раннє застосування її є більш ефективним. Підтвердженням тому є наш черговий клінічний випадок 2.

Пацієнтка Б. 24 роки, з діагнозом: закрыта хребетно-спинномозкова травма на рівні тіл Th12-L1 хребців, Frankel A (Рис.5.5).



Рис.5.5. МРТ дослідження торако-люмбального відділа хребта пацієнтки Б., після травми, перед операцією

Стан після закритої черепно мозкової травми з утворенням субдуральної гематоми, забою грудної клітини, двобічним гемопневмотораксом, забою черевної порожнини. Травма відбулась в наслідок ДТП 27.11.2020. Через важкість політравми, пацієнтка потрапила в лікарню швидкої допомоги, і з часом, після стабілізації загального стану, а саме видалення субдуральної гематоми та дренування обох плевральних порожнин, пацієнтка була переведена до інституту нейрохірургії для проведення подальшого хірургічного втручання на хребті. Через 3 місяці після травми (22.02.2021) пацієнтка була прооперована: вертеброектомія Th12,L1 хребців, з коорпородезом телескопічним імплантом Mesh. Малоінвазивна транскутанна задня транспедикулярна фіксація разом з реклінацією Th10,Th11,L2,L3 хребців. Встановлення епідуральної електростимулюючої системи (Рис. 5.6).



Рис.5.6. МРТ дослідження торако-люмбального відділа хребта пацієнтки після операції. Стабілізація та встановлення системи для ЕЕС

Післяопераційний період перебігав без ускладнень, пацієнтка була виписана через 14 днів після хірургічного втручання на момент виписки з боку неврологічного статусу було: нижня параплегія, порушення функцій органів тазу у вигляді затримки сечі( катетеризація сечового міхура).

Через 1,5 роки після хірургічного втручання пацієнтка приїхала на контрольний огляд, весь період пацієнтка активно займалась реабілітаційним лікуванням, яке було доповнено сеансами електростимуляції, в основному електростимуляція проводилась під час реабілітаційних занять. Через 1,5 роки в неврологічному статусі відбулись значні зрушення, у вигляді збільшення м'язової сили в нижніх кінцівках: права нога проксимально – 3 бали, дистально – 2 бали, ліва нога проксимально – 3 бали, дистально – 2 бали. Пацієнтка за допомогою фіксуючих ортезів вертикалізувалася самостійно та пересувалася за допомогою ходунків. Також було відмічено зниження больового синдрому за класифікацією Numerical scale pain rating (NSPR) з 7 балів до 2 балів. З боку функцій органів тазу пацієнтка відчувала наповнення сечового міхура, явища затримки були регресовані.

Викладені у розділі 5 матеріали опубліковано у статті:

1. Nekhlopochyn, O. S., Verbov, V. V., Cheshuk, I. V., Vorodi, M. V., Karpinsky, M. Y., & Yaresko, O. V. (2023). The biomechanical state of the thoracolumbar junction with various options of transpedicular fixation under flexion load. *Ukrainian Neurosurgical Journal*, 29(2), 49–56.  
<https://doi.org/10.25305/unj.277152>

## РОЗДІЛ 6

### РОЗВИТОК УСКЛАДНЕНЬ ПІСЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЕС

Інформацію про частоту ускладнень після встановлення системи для епідуральної електростимуляції ми не зустрічали в наукових публікаціях, мабуть тому, що це не дуже часте явище при дотриманні правил встановлення імплантів: стерильність, гемостаз, надійна фіксація та догляд.

Під час виконання нашої роботи за весь період спостереження у пацієнтів були наступні ускладнення, які ми встановили в ранньому післяопераційному періоді:

1. Запальні реакції з боку післяопераційної рани з наявністю вираженої кількості ексудату (2 пацієнти).

2. Некроз шкірних покривів в місці встановлення прийомної антени ( якщо поверхнево розташовувати антену, в ідеалі важливо встановлювати антену на м'язи, щільно прикриваючи підшкірною клітковиною) – 1 випадок.

3. Вихід ліквору за межі рани, лікворні кісти та лікворні подушки в підшкірному просторі, що розповсюджуються в ділянку прийомної антени (2 випадки).

4. Менінгіти, менінго-енцефаліти, якщо явища ліквореї не вдалось своєчасно купувати, а саме герметизувати рану (теоретично можливе, але у нас не виникало таке ускладнення).

5. Відрив проводів стимулюючої системи, дане ускладнення розвивається, якщо компоненти системи встановлення під натягом (2 випадки). Дані ускладнення показано в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1

Види та частота ускладнень після встановлення системи для епідуральної електростимуляції у пацієнтів з наслідками ушкодження спинного мозку

№ п/п	Назва ускладнення	2019 р. (22*)	2020 р. (19*)	2021-2023рр. (34 <sup>#</sup> )
		Кількість випадків, %	Кількість випадків, %	Кількість випадків, %
1	Запалення рани	1 (4,5 %)	1 (5.26 %)	0
2	Некроз шкіри над антеною	0	1 (5,26 %)	0
3	Лікворея	2 (9,1 %)	0	0
4	Менінгіт, менінгоенцефаліт	0	0	0
5	Відрив електродів	1 (4.5 %)	1 (5,26 %)	0
Всього		4 (18.18 %)	3 (15,78 %)	0

\* – кількість пацієнтів, яким було встановлено системи для епідуральної електростимуляції за рік;

# – кількість пацієнтів, яким було встановлено системи для епідуральної електростимуляції за 2021–2023 роки.

Розвиток вище описаних ускладнень приводив до неефективної роботи системи для епідуральної електростимуляції та всього процесу відновлення загалом. Виникала дисфункція системи в ранньому післяопераційному періоді, чи через відходження пластини від твердої мозкової оболонки чи через появу патологічної рідини (гематома, ексудат, серома, ліквор), яка погіршує ефективну роботу системи.

**Клінічний випадок 3.** Пацієнт М., 26 років, з закритою хребтно-спинномозковою травмою на рівні тіл С5–С6 хребців. Травма відбулась в наслідок пірнання з висоти головою вниз у ставку. На другу добу (понад 24 години після травми), пацієнту було проведено декомпресивне хірургічне втручання у вигляді вентальної корпектомії С5-С6 з корпородезом титановим MESH імплантом та встановлення передньої фіксуєчої пластини. Через рік після проведеного хірургічного втручання неврологічний статус мав наступні характеристики: верхня дистальна плегія, проксимальний парез (сила 1 бал ліворуч 2 бали праворуч) нижня параплегія. Позитивні зміни в неврологічному статусі відбувались в продовж трьох місяців, та зупинились. Реабілітаційна терапія видимого покращення не давала. Тому через рік після травми пацієнт звернувся за допомогою зі скаргами на порушення рухів та чутливості в руках та ногах, також порушення органів тазу у вигляді затримки сечовипускання ( вимушена катетерезація сечового міхура). Було проведено хірургічне втручання: ламінектомія С6, встановлення першої електростимулюєчої системи епідурально та інтерлямінектомія Th12–L1 встановлення другої електростимулюєчої системи епідурально. Під час хірургічного втручання, особливо на шийному відділі хребта, відмічалась виражена кровоточивість з усіх тканин, та розширених епідуральних вен (пацієнт довгий час був на антикоагулянтах і їх відмінили за 5 діб до хірургічного втручання). Проводився поетапний гемостаз. Перед зашиванням рани, видимих джерел кровотеї не було, однак на 5 добу післяопераційного періоду в нижній третині рани на шийному відділі розвився діастаз країв рани шкіри та почалось виділення ексудату, серозно-геморагічного характеру. З боку лабораторних показників були збільшені лейкоцити до  $12 \cdot 10^9$  та швидкість осідання еритроцитів до 50 мм/год, також відмічався незначний зсув лейкоцитарної формули вліво зі збільшення паличко ядерних клітин до 20 %. Також виникла гіпертермія, що в вечірній час досягала  $38.4 \text{ } ^\circ\text{C}$ , менінгіальна симптоматика була негативною. Був виконаний бактеріологічний посів ексудату з рани, що не виявив

патологічного збудника, однак кількість ексудату почало збільшуватись до 80–120 мл за добу. Враховуючи наявність стороннього тіла, а саме епідуральної електростимулюючої системи, були ризики нагноєння в зоні електростимулюючої системи. Післяопераційна рана в проекції остистих Th12–L1 загоювалась первинним натягом без ознак запалення. З боку антибактеріальної терапії використовувались: Метронідазол 100.0мл 3 рази на добу та Цефтріаксон 2,0 г 2 рази на добу шляхом внутрішньовенного введення. Також до лікування було додано Далацин 300 мг перорально по 1 таблетці 2 рази на добу. Через 2 дні з боку лабораторних показників було виявлено зменшення лейкоцитів до  $9.6 \cdot 10^9$ , зменшення паличко ядерних клітин до 8 %, однак швидкість осідання еритроцитів залишалась 40 – 43 мм/год. Кількість ексудату з рани становила 90 мл на добу. Було прийнято рішення за постановку активного вакуумного дренажа, (сильфон) що був виведений через контрапертуру 2 см від післяопераційної рани, ослизненні краї рани через які виділявся ексудат були висічені та перешиті, таким чином була досягнута геметизація рани та розгрузка ексудату через дренажну систему. Під час спостереження на 3 добу було зменшення ексудату до 45 мл. Та поступове зменшення ексудату на 5–7 мл за кожен наступний день післяопераційного періоду. Через тиждень після встановлення системи дренивання з активним вакуумним приймачем рана загоїлась первинним натягом без ознак запалення. З боку лабораторних показників рівень лейкоцитів становив  $6.5 \cdot 10^9$ , швидкість осідання еритроцитів – 9 мм/год. Паличко ядерні клітини – 1. Явища гіпертермії були відсутні, температура тіла не піднімалась вище за 36,8 °С. Пацієнт почав відчувати електростимуляцію, та особливо смитуляцію нижніх кінцівок, навіть через прийомну антену на шийному рівні. В данному випадку під час спостережень, кількість ексудату почало різко знижуватись після вакуумного дренивання, що могло бути спричинено вакуумним впливом на тканини (таким чином зменшуючи об'єм порожнини), та розгрузкою раневої порожнини від ексудату, шляхом створення окремого каналу для відтоку.

Через рік після встановлення стимулюючої системи разом з комплексом реабілітаційних заходів, з боку неврологічного статусу відмічалось збільшення м'язової сили в верхній кінцівках до 4 балів симетрично, дистально та проксимально, м'язева сила в нижніх кінцівках становила 2 бали з обох сторін, що дозволяло пацієнту знаходитись в вертикальному положенні з підтримкою ортезів (Рис. 6.1).



Рис.6.1. Пацієнт М., через рік після встановлення 2-х систем для епідуральної електростимуляції

Також хочемо зробити акцент уваги на профілактиці ускладнень даної методики. Під час встановлення систем стимуляції, ми зіткнулись з запальними, ексудативними реакціями з боку післяопераційної рани, які можуть призвести до видалення стимулюючої системи. Для того щоб зменшити ризики потрібно приділяти увагу гемостазу під час операції, та пошаровому ушиванню рани, таким чином зменшуючи порожнину рани, якщо

виникає виділення ексудату з рани, одразу протрібно проводити герметизацію раньового простору, з додатковою розгрузкою активним вакуумним дренажем. Також існує досить виражене ускладнення в наслідок ушкодження твердої мозкової оболонки та виходом ліквору, в даному випадку не можна застосовувати активне дренування, так як це може призвести до вираженої лікворної гіпотензії. Тому під час операції дуже важливо фіксувати пластинки до зовнішнього листка твердої оболонки без отримання ліквору. Якщо цілісність була порушена, важливо ушити дефект (якщо є технічна можливість) закрити дефект багатошарово (сержиселем) дуже важливо щільне вівставлення апоневрозу, та щільне співставлення та ушивання всіх шарів, але навіть виконання всіх умов не може повністю виключити лікворею, тому інколи проводиться встановлення люмбального дренажу, для додаткової розгрузки рани. Медикаментозно, окрім антибактеріальної терапії, призначаються, з метою зменшення лікворопродукції, діакарб 250 мг по 1 таблетці 1 раз на день та гіпотіазід 150 мг по 1 таблетці 1 раз на день, з контролем рівня електролітів крові (зниження ризиків порушення серцевого ритму). Також важливо щільно ушивати канал, по якому заводимо прийомну антену та прикривати самі пластинки електростимулятора, так як ліквор може розповсюджуватись в ділянку виведення антени по проводу системи.

В підсумку можемо зазначити, що дотримання всіх цих правил під час встановлення системи для епідуральної електростимуляції дозволило нам уникати розвитку ускладнень після 2020 року. До 2020 року пацієнти нас були випадки ранньої дисфункції стимулюючої системи, що при ревізії ран, інтраопераціно було встановлено відрив пластинок електродів від твердої мозкової оболонки. Тому ми змінили спосіб фіксації стимулюючих пластинок, пластинка фіксується до твердої мозкової оболонки трьома окремими лігатурами (6\0-7\0) з застосуванням мікроскопу та мікрохірургічної техніки, перша лігатура фіксує центр пластинки до твердої мозкової оболонки, друга лігатура фіксує нижню частину пластинки, третя лігатура фіксує початкову частину проводу, що підходить до пластинки. Кожна пластинка з чотирьох

фіксується окремо. Також самі провода фіксуються до м'язів та фрагментів жовтої зв'язки, щоб зменшити навантаження на систему, особливо під час реабілітаційних заходів. Даний тип фіксації дозволяє розмістити компоненти системи без натягу і після нової методики типу фіксації електродів жоден стимулятор з 2021 року не вийшов з ладу.

## РОЗДІЛ 7

### ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Соціальну важливість лікування наслідків УСМ важко переоцінити, особливо в наш час повномасштабного вторгнення росії в Україну. Кількість травмованих пацієнтів постійно зростає за статистикою в розвинених країнах [1] і в Україні зокрема за період з 2022 року. В США, наприклад, за статистикою щорічно отримують травму спинного мозку 18 000 осіб, здебільшого чоловіки, працездатного віку [124]. Загалом налічується 302 000 таких осіб з наслідками УСМ і вони є інвалідами. Тому лікування даної категорії пацієнтів набирає особливо актуального питання.

В дисертаційному дослідженні «Хірургічне лікування наслідків пошкодження спинного мозку методикою епідуральної стимуляції» за розробленим дизайном було дві групи: дослідна та група порівняння, всього 96 пацієнтів в співвідношенні 2:1 (65:31). В обох групах було хірургічне лікування, яке було необхідним для проведення декомпресії спинного мозку та фіксації хребта, але в дослідній групі лікування було доповнено ще встановленням систем для епідуральної електростимуляції для подальшого проведення сеансів ЕЕС. В дослідній групі окремо була виділена дослідна (а) група, в якій було 31 особа, як і в групі порівняння, і за давністю травми вони були однорідними. Тому що, в загальній дослідній групі (65 пацієнтів) час після травми до операції коливався до 8 років, тоді як групі порівняння і дослідній (а) групі цей час був до 2 років. Нас цікавила можливість відновлення наслідків ушкодження спинного мозку в ранні і більш пізні строки за допомогою методики епідуральної електростимуляції.

За останніми міжнародними рекомендаціями хірургічне лікування травми спинного мозку рекомендують проводити до 24 годин після моменту ушкодження його і тоді результат може бути настільки задовільним, що наслідки ушкодження будуть мінімальними і необхідності в проведенні ЕЕС

не буде. Але в нашому дослідженні таких пацієнтів не було і тому наслідки УСМ покращувались після хірургічного лікування але в результаті тривалої гіпоксії, компресії нервових структур відновлення було не повним а часто незначним. В групі де додатково застосовували ЕЕС до класичного хірургічного лікування результати бели суттєво кращими (як вранні строки після травми, так і в значно пізніші), що говорить про ефективність такої методики. Ми ще не фіксували системно такий симптом, як покращання еректильної функції у чоловіків, та порушення утримання калу у чоловіків та жінок, але вони мали тенденцію до покращання практично у всіх разом із відновленням функціонального стану сечового міхура.

Отже, була розроблена ефективна і безпечна методика встановлення однієї або двох систем електродів для ЕЕС у пацієнтів з наслідками УСМ, яка з 2021 року виконувалась без ускладнень, які раніше зустрічались. Метод епідуральної електростимуляції спинного мозку в комплексному лікуванні УСМ дозволяє відновити функціональні порушення сечового міхура в 22,6 % випадків порівнянні з лише хірургічним лікуванням ( $p < 0,05$ ).

Всі параметри, які ми оцінювали, при аналізі результатів лікування УСМ методом ЕЕС мали кращі результати ніж в контрольній групі. Статистично значимо зменшувався больовий синдром ( $p < 0,0001$ ), він був в 1.89 рази менший ніж в групі порівняння, зменшувалась суттєво спастичність ( $p < 0,0001$ ), вона була 2,11 разів меншою ніж в групі порівняння. В 3,6 рази краще відновлювалась моторика в порівнянні з контрольною групою ( $p < 0,0001$ ). Після проведення сеансів ЕЕС разом реабілітаційними заходами, відновлювались рухи в кінцівках, тулубі, підвищувалась сила м'язів. В кожному конкретному випадку це залежало від тривалості комплексу реабілітаційних заходів та важкості травми УСМ.

Сенсорний дефіцит зменшувався, відновлення чутливості після проведення ЕЕС в дослідній (а) групі статистично значимо ( $p = 0,0007$ ) була більшою ніж в групі порівняння. Всі показники в дослідній (а) групі статистично значимо покращувались на відміну від групи порівняння

Перевагою методу є ще те, що його можна застосовувати і в значно пізніші строки (в нашому дослідженні 8 років після травми і попереднього хірургічного лікування: декомпресія і транспедикулярна фіксація) і стимулювати процеси відновлення нервових функцій резерви яких довго можуть зберігатись. Показами до електростимуляції спинного мозку можуть бути нейропатичні болі після травматичних ушкоджень спинного мозку, синдром оперованого хребта (ятрогенні пошкодження).

Сьогодні епідуральна електростимуляція спинного мозку широко застосовується для лікування невропатичних больових синдромів та корекції порушення функцій сечового міхура [45], для відновлення рухів в нижніх кінцівках у хворих з параплегією [46 ] корекцію спастичності м'язів нижніх кінцівок та відновлення рухів в верхніх кінцівках у хворих з ушкодженням шийних сегментів спинного мозку [43],

Електростимуляція може відновлювати, здебільшого частково, втрачені сенсорні, моторні та вегетативні функції. Епідуральна стимуляція покращує контроль рухів шляхом зміни м'язової синергії [102]. Сила і ступінь відновлення м'язової сили та чутливого компоненту залежить від багатьох факторів і вони індивідуальні (і має специфіку в кожному випадку). Проводиться багато досліджень для пошуку нових технологій, методик, режимів епідуральної електростимуляції з метою отримання стійких ефективних результатів [106-110]. Особливо перспективним напрямом є вивчення можливостей і результатів поєднання застосування епідуральної електростимуляції з засобами фізичної реабілітації і удосконаленням традиційних методик [110-112]. Нами був розроблений алгоритм застосування ЕЕС в комплексному лікуванні УСМ.

Викладені у розділі 7 матеріали опубліковано у статтях:

1. Nekhlпочyn, O., Verbov, V., Cheshuk, I., Karpinsky, M., & Yaresko, O. (2023). Mathematical modeling of variants of transpedicular fixation at the

- thoracolumbar junction after Th12 vertebrectomy during trunk backward bending. *Orthopedical traumatology and prosthetics*, (2), 43–49. <https://doi.org/10.15674/0030-59872023243-49>
2. Komarov, M. P., Nekhlopochyn, O. S., Verbov, V. V., Chernenko, O. H., Shmelova, A. A., Cheshuk, I. V., & Malysheva, T. A. (2023). Chondroblastoma of the cervical-thoracic junction: global data and own experience. *Ukrainian Neurosurgical Journal*, 29(3), 66–76. <https://doi.org/10.25305/unj.277910>
  3. Nekhlopochyn, O. S., Verbov, V. V., Cheshuk, I. V., & Vorodi, M. V. (2023). Assessment of risk factors for the vertebral body kyphotic deformity progression in patients with type A1 injuries of the thoracolumbar junction. *Ukrainian Neurosurgical Journal*, 29(3), 26–33. <https://doi.org/10.25305/unj.278927>
  4. Nekhlopochyn, O., Verbov, V., Cheshuk, I., & Vorodi, M. (2023). The value of the posterior ligamentous complex in traumatic injury of thoracolumbar junction. Part 1. Morphology and biomechanics. *TRAUMA*, 24(3), 12–20. <https://doi.org/10.22141/1608-1706.3.24.2023.950>

## ВИСНОВКИ

У дисертації на підставі проведеного комплексного клінічного дослідження представлено теоретичне узагальнення та новий підхід до вирішення актуальної наукової проблеми нейрохірургії — удосконалення відновного лікування травми спинного мозку з використанням методу хронічної епідуральної електростимуляції на тлі декомпресії спинного мозку, стабілізації хребта та мієлорадикулолізу.

1. Розроблено ефективну і безпечну методику епідуральної електростимуляції з використанням однієї або двох систем електродів, імплантованих над шийним і/або попереково-крижовим потовщенням спинного мозку у пацієнтів з наслідками хребетно-спинномозкової травми.
2. Метод епідуральної електростимуляції спинного мозку в комплексному лікуванні УСМ дозволяє відновити функціональні порушення сечового міхура в 22,6% випадків порівнянні з лише хірургічним лікуванням ( $p < 0,05$ ).
3. Метод епідуральної електростимуляції спинного мозку в комплексному лікуванні УСМ дозволяє суттєво зменшувати больовий синдром ( $p < 0,0001$ ), результати в 1.89 рази є кращими ніж у контрольній групі.
4. Проведення епідуральної електростимуляції спинного мозку в комплексному лікуванні УСМ дозволяє зменшувати статистично значимо спастичність ( $p < 0,0001$ ), вона була 2,11 разів меншою ніж в групі порівняння.
5. Застосування епідуральної електростимуляції спинного мозку в комплексному лікуванні УСМ дозволяє в 3,6 рази ( $p < 0,0001$ ) відновлювати втрачені моторні функції та зменшувати сенсорний дефіцит ( $p = 0,0007$ ) в порівнянні з контрольною групою.
6. На основі проведеного комплексного дослідження запропоновано новий алгоритм діагностики та лікування хребетно-спинномозкової травми з використанням методу хронічної епідуральної електростимуляції спинного мозку.

## ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Пацієнтам з ушкодженням спинного мозку для відновлення його функцій рекомендовано проводити комплекс хірургічних утручань, спрямованих на декомпресію спинного мозку та фіксацію хребра проводити або одномоментну чи відстрочену епідуральну електростимуляцію через спеціально встановлену систему.
2. Для пацієнтів з ушкодженням шийних сегментів спинного мозку рекомендовано поряд з хірургічним лікуванням наслідків (декомпресія, стабілізація) встановлювати дві системи для ЕЕС на шийне та поперекове спинномозкове потовщення, що є більш ефективно.
3. При за давних травмах та повторних хірургічних утручаннях ефективним є проведення мієлорадикулोलізу та встановлення системи для ЕЕС в місці травми.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Нехлопочин, О. С., Никифорова, А. М., Вербов, В. В., Йовенко, Т. А., & Чешук, Є. В. (2023). Аналіз епідеміології травматичних ушкоджень хребта в країнах Східної Європи. *Ukrainian Neurosurgical Journal*, 29(4), 22–34. <https://doi.org/10.25305/unj.286922>
2. Гур'єв С.О., Танасієнко П.В., Палагнюк К.В. (2017). Вплив пошкоджень хребта на результат перебігу травматичного процесу у постраждалих з політравмою в результаті ДТП. *Вісник Вінницького національного медичного університету*, 1, Ч2 (Т21), 309–312. Режим доступу: [https://www.vnmu.edu.ua/downloads/other/visnik\\_2017\\_21\(1\)\\_Ch.2.pdf](https://www.vnmu.edu.ua/downloads/other/visnik_2017_21(1)_Ch.2.pdf)
3. Schwab M. E. (2002). Repairing the injured spinal cord. *Science (New York, N.Y.)*, 295(5557), 1029–1031. <https://doi.org/10.1126/science.1067840>
4. Park, E., Velumian, A. A., & Fehlings, M. G. (2004). The role of excitotoxicity in secondary mechanisms of spinal cord injury: a review with an emphasis on the implications for white matter degeneration. *Journal of neurotrauma*, 21(6), 754–774. <https://doi.org/10.1089/0897715041269641>
5. Wang, C. Y., Chen, J. K., Wu, Y. T., Tsai, M. J., Shyue, S. K., Yang, C. S., & Tzeng, S. F. (2011). Reduction in antioxidant enzyme expression and sustained inflammation enhance tissue damage in the subacute phase of spinal cord contusive injury. *Journal of biomedical science*, 18(1), 13. <https://doi.org/10.1186/1423-0127-18-13>
6. Chan C. C. (2008). Inflammation: beneficial or detrimental after spinal cord injury? *Recent patents on CNS drug discovery*, 3(3), 189–199. <https://doi.org/10.2174/157488908786242434>
7. Kang, C. E., Poon, P. C., Tator, C. H., & Shoichet, M. S. (2009). A new paradigm for local and sustained release of therapeutic molecules to the injured spinal cord for neuroprotection and tissue repair. *Tissue engineering. Part A*, 15(3), 595–604. <https://doi.org/10.1089/ten.tea.2007.0349>

8. Liu, S., Xu, G. Y., Johnson, K. M., Echetebe, C., Ye, Z. S., Hulsebosch, C. E., & McAdoo, D. J. (2008). Regulation of interleukin-1beta by the interleukin-1 receptor antagonist in the glutamate-injured spinal cord: endogenous neuroprotection. *Brain research*, *1231*, 63–74. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2008.07.035>
9. Rabinowitz, R. S., Eck, J. C., Harper, C. M., Jr, Larson, D. R., Jimenez, M. A., Parisi, J. E., Friedman, J. A., Yaszemski, M. J., & Currier, B. L. (2008). Urgent surgical decompression compared to methylprednisolone for the treatment of acute spinal cord injury: a randomized prospective study in beagle dogs. *Spine*, *33*(21), 2260–2268. <https://doi.org/10.1097/BRS.0b013e31818786db>
10. Xie, F., & Zheng, B. (2008). White matter inhibitors in CNS axon regeneration failure. *Experimental neurology*, *209*(2), 302–312. <https://doi.org/10.1016/j.expneurol.2007.07.005>
11. Wang, L., Hu, B., Wong, W. M., Lu, P., Wu, W., & Xu, X. M. (2009). Glial and axonal responses in areas of Wallerian degeneration of the corticospinal and dorsal ascending tracts after spinal cord dorsal funiculotomy. *Neuropathology : official journal of the Japanese Society of Neuropathology*, *29*(3), 230–241. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1789.2008.00969.x>
12. Yiu, G., & He, Z. (2006). Glial inhibition of CNS axon regeneration. *Nature reviews. Neuroscience*, *7*(8), 617–627. <https://doi.org/10.1038/nrn1956>
13. Ghosh, A., Haiss, F., Sydekum, E., Schneider, R., Gulló, M., Wyss, M. T., Mueggler, T., Baltes, C., Rudin, M., Weber, B., & Schwab, M. E. (2010). Rewiring of hindlimb corticospinal neurons after spinal cord injury. *Nature neuroscience*, *13*(1), 97–104. <https://doi.org/10.1038/nn.2448>
14. Côté, M. P., Azzam, G. A., Lemay, M. A., Zhukareva, V., & Houlié, J. D. (2011). Activity-dependent increase in neurotrophic factors is associated with an enhanced modulation of spinal reflexes after spinal cord injury. *Journal of neurotrauma*, *28*(2), 299–309. <https://doi.org/10.1089/neu.2010.1594>
15. Macias, M., Nowicka, D., Czupryn, A., Sulejczak, D., Skup, M., Skangiel-Kramska, J., & Czarkowska-Bauch, J. (2009). Exercise-induced motor improvement

after complete spinal cord transection and its relation to expression of brain-derived neurotrophic factor and presynaptic markers. *BMC neuroscience*, 10, 144. <https://doi.org/10.1186/1471-2202-10-144>

16. Цимбалюк, В.І., Ямінський, Ю.Я. (2009). Реконструктивно-відновна хірургія спинного мозку. К: Авіцена. с. 59.

17. Boulenguez, P., & Vinay, L. (2009). Strategies to restore motor functions after spinal cord injury. *Current opinion in neurobiology*, 19(6), 587–600. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2009.10.005>.

18. Liu, Y., Wang, X., Lu, C. C., Kerman, R., Steward, O., Xu, X. M., & Zou, Y. (2008). Repulsive Wnt signaling inhibits axon regeneration after CNS injury. *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, 28(33), 8376–8382. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1939-08.2008>

19. Wu, B., & Ren, X. J. (2008). Control of demyelination for recovery of spinal cord injury. *Chinese journal of traumatology = Zhonghua chuang shang za zhi*, 11(5), 306–310. [https://doi.org/10.1016/s1008-1275\(08\)60062-0](https://doi.org/10.1016/s1008-1275(08)60062-0)

20. Gros, T., Sakamoto, J. S., Blesch, A., Havton, L. A., & Tuszynski, M. H. (2010). Regeneration of long-tract axons through sites of spinal cord injury using templated agarose scaffolds. *Biomaterials*, 31(26), 6719–6729. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2010.04.035>

21. Tsymbalyuk, V. I., Chebotaryova, L. L., & Yaminskiy, Y. Y. (2002). Трансплантація ембріональної нервової тканини як метод відновлення функцій спинного мозку після травми в експерименті. *Ukrainian Neurosurgical Journal*, (1), 69–76. Режим доступу: <https://theunj.org/article/view/90517> [In Ukrainian]

22. Kuo, H. S., Tsai, M. J., Huang, M. C., Chiu, C. W., Tsai, C. Y., Lee, M. J., Huang, W. C., Lin, Y. L., Kuo, W. C., & Cheng, H. (2011). Acid fibroblast growth factor and peripheral nerve grafts regulate Th2 cytokine expression, macrophage activation, polyamine synthesis, and neurotrophin expression in transected rat spinal cords. *The Journal of neuroscience: the official journal of the Society for*

*Neuroscience*, 31(11), 4137–4147. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2592-10.2011>

23. Ishii, K., Toda, M., Nakai, Y., Asou, H., Watanabe, M., Nakamura, M., Yato, Y., Fujimura, Y., Kawakami, Y., Toyama, Y., & Uyemura, K. (2001). Increase of oligodendrocyte progenitor cells after spinal cord injury. *Journal of neuroscience research*, 65(6), 500–507. <https://doi.org/10.1002/jnr.1180>

24. Hyun, J. K., & Kim, H. W. (2010). Clinical and experimental advances in regeneration of spinal cord injury. *Journal of tissue engineering*, 2010, 650857. <https://doi.org/10.4061/2010/650857>

25. Schwab M. E. (1996). Molecules inhibiting neurite growth: a minireview. *Neurochemical research*, 21(7), 755–761. <https://doi.org/10.1007/BF02532297>

26. Bonner, J. F., Blesch, A., Neuhuber, B., & Fischer, I. (2010). Promoting directional axon growth from neural progenitors grafted into the injured spinal cord. *Journal of neuroscience research*, 88(6), 1182–1192. <https://doi.org/10.1002/jnr.22288>

27. Lee, M. J., Chen, C. J., Huang, W. C., Huang, M. C., Chang, W. C., Kuo, H. S., Tsai, M. J., Lin, Y. L., & Cheng, H. (2011). Regulation of chondroitin sulphate proteoglycan and reactive gliosis after spinal cord transection: effects of peripheral nerve graft and fibroblast growth factor 1. *Neuropathology and applied neurobiology*, 37(6), 585–599. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2990.2011.01182.x>

28. Côté, M. P., Amin, A. A., Tom, V. J., & Houle, J. D. (2011). Peripheral nerve grafts support regeneration after spinal cord injury. *Neurotherapeutics: the journal of the American Society for Experimental NeuroTherapeutics*, 8(2), 294–303. <https://doi.org/10.1007/s13311-011-0024-6>

29. Ruff, C. A., & Fehlings, M. G. (2010). Neural stem cells in regenerative medicine: bridging the gap. *Panminerva medica*, 52(2), 125–147. PMID: 20517196.

30. Thomas, K. E., & Moon, L. D. (2011). Will stem cell therapies be safe and effective for treating spinal cord injuries? *British medical bulletin*, 98, 127–142. <https://doi.org/10.1093/bmb/ldr013>

- 31.** Schwartz M. (2010). "Tissue-repairing" blood-derived macrophages are essential for healing of the injured spinal cord: from skin-activated macrophages to infiltrating blood-derived cells? *Brain, behavior, and immunity*, 24(7), 1054–1057. <https://doi.org/10.1016/j.bbi.2010.01.010>
- 32.** Mothe, A. J., Bozkurt, G., Catapano, J., Zabojska, J., Wang, X., Keating, A., & Tator, C. H. (2011). Intrathecal transplantation of stem cells by lumbar puncture for thoracic spinal cord injury in the rat. *Spinal cord*, 49(9), 967–973. <https://doi.org/10.1038/sc.2011.46>
- 33.** Pal, R., Gopinath, C., Rao, N. M., Banerjee, P., Krishnamoorthy, V., Venkataramana, N. K., & Totey, S. (2010). Functional recovery after transplantation of bone marrow-derived human mesenchymal stromal cells in a rat model of spinal cord injury. *Cytotherapy*, 12(6), 792–806. <https://doi.org/10.3109/14653249.2010.487899>
- 34.** Woerly, S., Doan, V. D., Evans-Martin, F., Paramore, C. G., & Peduzzi, J. D. (2001). Spinal cord reconstruction using NeuroGel implants and functional recovery after chronic injury. *Journal of neuroscience research*, 66(6), 1187–1197. <https://doi.org/10.1002/jnr.1255>
- 35.** Tsymbalyuk, V. I., Nosov, A. T., Semenova, V. M., Yaminsky, Y. Y., Vaslovich, V. V., & Medvedev, V. V. (2009). Ультроструктурні особливості процесу організації в зоні травматичного пошкодження спинного мозку та імплантації синтетичного макропористого гідрогелю. *Ukrainian Neurosurgical Journal*, (4), 51–56. <https://doi.org/10.25305/unj.108013>
- 36.** Mironov, S. P., Stepanov, G. A., Grishin, I. G., Golubev, V. G., Natsvlshvili, Z. G., Russkikh, S. V., Karpov, I. N., Khokhrikov, G. I., Kapryna, M. V., & Eskin, N. A. (2003). The first experience of reconstructive microsurgical operations in patients with traumatic spinal cord disease. *N.N. Priorov Journal Of Traumatology And Orthopedics*, 10(2), 15-19. doi: 10.17816/vto200310215-19 [In Ukranian].
- 37.** Gerasimenko, Y., Roy, R. R., & Edgerton, V. R. (2008). Epidural stimulation: comparison of the spinal circuits that generate and control locomotion in rats, cats

- and humans. *Experimental neurology*, 209(2), 417–425.  
<https://doi.org/10.1016/j.expneurol.2007.07.015>
38. Barthélemy, D., Leblond, H., & Rossignol, S. (2007). Characteristics and mechanisms of locomotion induced by intraspinal microstimulation and dorsal root stimulation in spinal cats. *Journal of neurophysiology*, 97(3), 1986–2000.  
<https://doi.org/10.1152/jn.00818.2006>
39. Dougherty K. J. (2023). Distinguishing subtypes of spinal locomotor neurons to inform circuit function and dysfunction. *Current Opinion in Neurobiology*, 82,102763. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2023.102763>
40. Walters B. C. (2010). Oscillating field stimulation in the treatment of spinal cord injury. *PM & R : the journal of injury, function, and rehabilitation*, 2(12 Suppl 2), S286–S291. <https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2010.10.014>
41. Bellardita, C., Kiehn, O. (2015) Phenotypic characterization of speed-associated gait changes in mice reveals modular organization of locomotor networks. *Current Biology*, 25(11), 1426-36.  
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2015.04.005>
42. Ichiyama, R. M., Gerasimenko, Y. P., Zhong, H., Roy, R. R., & Edgerton, V. R. (2005). Hindlimb stepping movements in complete spinal rats induced by epidural spinal cord stimulation. *Neuroscience letters*, 383(3), 339–344.  
<https://doi.org/10.1016/j.neulet.2005.04.049>
43. Shapiro, S., Borgens, R., Pascuzzi, R., Roos, K., Groff, M., Purvines, S., Rodgers, R. B., Hagy, S., & Nelson, P. (2005). Oscillating field stimulation for complete spinal cord injury in humans: a phase 1 trial. *Journal of neurosurgery. Spine*, 2(1), 3–10. <https://doi.org/10.3171/spi.2005.2.1.0003>
44. Wenjin, W., Wenchao, L., Hao, Z., Feng, L., Yan, W., Wodong, S., Xianqun, F., & Wenlong, D. (2011). Electrical stimulation promotes BDNF expression in spinal cord neurons through Ca(2+)- and Erk-dependent signaling pathways. *Cellular and molecular neurobiology*, 31(3), 459–467.  
<https://doi.org/10.1007/s10571-010-9639-0>

45. Courtine, G., Song, B., Roy, R. R., Zhong, H., Herrmann, J. E., Ao, Y., Qi, J., Edgerton, V. R., & Sofroniew, M. V. (2008). Recovery of supraspinal control of stepping via indirect propriospinal relay connections after spinal cord injury. *Nature medicine*, *14*(1), 69–74. <https://doi.org/10.1038/nm1682>
46. Vialle, R., Lacroix, C., Harding, I., Loureiro, M. C., & Tadié, M. (2010). Motor and sensitive axonal regrowth after multiple intercosto-lumbar neurotizations in a sheep model. *Spinal cord*, *48*(5), 367–374. <https://doi.org/10.1038/sc.2009.144>
47. Vialle, R., Lozeron, P., Loureiro, M. C., & Tadié, M. (2008). Multiple lumbar roots neurotizations with the lower intercostal nerves. Preliminary clinical and electrophysiological results in a sheep model. *The Journal of surgical research*, *149*(2), 199–205. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2007.10.016>
48. Lin, H., Hou, C., & Zhen, X. (2008). Bypassing spinal cord injury: surgical reconstruction of afferent and efferent pathways to the urinary bladder after conus medullaris injury in a rat model. *Journal of reconstructive microsurgery*, *24*(8), 575–581. <https://doi.org/10.1055/s-0028-1090599>
49. Vialle, R., Court, C., Harding, I., Lepeintre, J. F., Khouri, N., & Tadié, M. (2006). Multiple lumbar plexus neurotizations of the ninth, tenth, and eleventh intercostal nerves. *Clinical anatomy (New York, N.Y.)*, *19*(1), 51–58. <https://doi.org/10.1002/ca.20148>
50. Lin, H., Hou, C. L., Zhong, G., Xie, Q., & Wang, S. (2008). Reconstruction of reflex pathways to the atonic bladder after conus medullaris injury: preliminary clinical results. *Microsurgery*, *28*(6), 429–435. <https://doi.org/10.1002/micr.20504>
51. Kiehn O. (2006). Locomotor circuits in the mammalian spinal cord. *Annual review of neuroscience*, *29*, 279–306. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.29.051605.112910>
52. Mackinnon, S. E., & Colbert, S. H. (2008). Nerve transfers in the hand and upper extremity surgery. *Techniques in hand & upper extremity surgery*, *12*(1), 20–33. <https://doi.org/10.1097/BTH.0b013e31812714f3>

53. Wood, M. B., & Murray, P. M. (2007). Heterotopic nerve transfers: recent trends with expanding indication. *The Journal of hand surgery*, 32(3), 397–408. <https://doi.org/10.1016/j.jhsa.2006.12.012>
54. Cizmar, I., Zalesak, B., Pilny, J., Drac, P., & Fialova, J. (2006). Possible restorations of the upper extremity motion in tetraplegic patients - 5-year clinical experience. *Biomedical papers of the Medical Faculty of the University Palacky, Olomouc, Czechoslovakia*, 150(2), 313–319. <https://doi.org/10.5507/bp.2006.048>
55. Цымбалюк, В. И., Медведев, В. В. (2010). Спинной мозг. Элегия надежды: монография. Винница: Нова Книга. 944 с.
56. Kumar, R., Lim, J., Mekary, R. A., Rattani, A., Dewan, M. C., Sharif, S. Y., Osorio-Fonseca, E., & Park, K. B. (2018). Traumatic Spinal Injury: Global Epidemiology and Worldwide Volume. *World neurosurgery*, 113, e345–e363. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2018.02.033>
57. NSCISC. National spinal cord injury statistical center, 2021 annual report - complete public version. 2021.
58. Kirshblum, S., Millis, S., McKinley, W., & Tulskey, D. (2004). Late neurologic recovery after traumatic spinal cord injury. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 85(11), 1811–1817. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2004.03.015>
59. Mushahwar, V. K., Jacobs, P. L., Normann, R. A., Triolo, R. J., & Kleitman, N. (2007). New functional electrical stimulation approaches to standing and walking. *Journal of neural engineering*, 4(3), S181–S197. <https://doi.org/10.1088/1741-2560/4/3/S05>
60. Lam, T., Eng, J. J., Wolfe, D. L., Hsieh, J. T., Whittaker, M., & the SCIRE Research Team (2007). A systematic review of the efficacy of gait rehabilitation strategies for spinal cord injury. *Topics in spinal cord injury rehabilitation*, 13(1), 32–57. <https://doi.org/10.1310/sci1301-32>
61. Craven, B. C., Giangregorio, L. M., Alavinia, S. M., Blencowe, L. A., Desai, N., Hitzig, S. L., Masani, K., & Popovic, M. R. (2017). Evaluating the efficacy of functional electrical stimulation therapy assisted walking after chronic motor incomplete spinal cord injury: effects on bone biomarkers and bone strength. *The*

<https://doi.org/10.1080/10790268.2017.1368961>

- 62.** Marquez-Chin, C., & Popovic, M. R. (2020). Functional electrical stimulation therapy for restoration of motor function after spinal cord injury and stroke: a review. *Biomedical engineering online*, 19(1), 34. <https://doi.org/10.1186/s12938-020-00773-4>
- 63.** Jones, M. L., Evans, N., Tefertiller, C., Backus, D., Sweatman, M., Tansey, K., & Morrison, S. (2014). Activity-based therapy for recovery of walking in individuals with chronic spinal cord injury: results from a randomized clinical trial. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 95(12), 2239–46.e2. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2014.07.400>
- 64.** Peña Pino, I., Hoover, C., Venkatesh, S., Ahmadi, A., Sturtevant, D., Patrick, N., Freeman, D., Parr, A., Samadani, U., Balser, D., Krassioukov, A., Phillips, A., Netoff, T. I., & Darrow, D. (2020). Long-Term Spinal Cord Stimulation After Chronic Complete Spinal Cord Injury Enables Volitional Movement in the Absence of Stimulation. *Frontiers in systems neuroscience*, 14, 35. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2020.00035>
- 65.** Darrow, D., Balser, D., Netoff, T. I., Krassioukov, A., Phillips, A., Parr, A., & Samadani, U. (2019). Epidural Spinal Cord Stimulation Facilitates Immediate Restoration of Dormant Motor and Autonomic Supraspinal Pathways after Chronic Neurologically Complete Spinal Cord Injury. *Journal of neurotrauma*, 36(15), 2325–2336. <https://doi.org/10.1089/neu.2018.6006>
- 66.** Zhao, Z., Ahmadi, A., Hoover, C., Grado, L., Peterson, N., Wang, X., Freeman, D., Murray, T., Lamperski, A., Darrow, D., & Netoff, T. I. (2021). Optimization of Spinal Cord Stimulation Using Bayesian Preference Learning and Its Validation. *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering: a publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 29, 1987–1997. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2021.3113636>
- 67.** Singh, R. E., Iqbal, K., White, G., & Hutchinson, T. E. (2018). A Systematic Review on Muscle Synergies: From Building Blocks of Motor Behavior to a

Neurorehabilitation Tool. *Applied bionics and biomechanics*, 2018, 3615368. <https://doi.org/10.1155/2018/3615368>

**68.** Santuz, A., Ekizos, A., Eckardt, N., Kibele, A., & Arampatzis, A. (2018). Challenging human locomotion: stability and modular organisation in unsteady conditions. *Scientific reports*, 8(1), 2740. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21018-4>

**69.** Santuz, A., Brüll, L., Ekizos, A., Schroll, A., Eckardt, N., Kibele, A., Schwenk, M., & Arampatzis, A. (2020). Neuromotor Dynamics of Human Locomotion in Challenging Settings. *iScience*, 23(1), 100796. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2019.100796>

**70.** Hofstoetter, U. S., Perret, I., Bayart, A., Lackner, P., Binder, H., Freundl, B., & Minassian, K. (2020). Spinal motor mapping by epidural stimulation of lumbosacral posterior roots in humans. *iScience*, 24(1), 101930. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101930>

**71.** Anjum, A., Yazid, M. D., Fauzi Daud, M., Idris, J., Ng, A. M. H., Selvi Naicker, A., Ismail, O. H. R., Athi Kumar, R. K., & Lokanathan, Y. (2020). Spinal Cord Injury: Pathophysiology, Multimolecular Interactions, and Underlying R

**72.** Hadjipavlou, G., Cortese, A. M., Ramaswamy, B. (2016). Spinal cord injury and chronic pain. *BJA Education*, 16(8), 264–268, <https://doi.org/10.1093/bjaed/mkv073BJA>

**73.** Anjum, A., Cheah, Y. J., Yazid, M. D., Daud, M. F., Idris, J., Ng, M. H., Naicker, A. S., Ismail, O. H., Athi Kumar, R. K., Tan, G. C., Wong, Y. P., Mahadi, M. K., & Lokanathan, Y. (2022). Protocol paper: kainic acid excitotoxicity-induced spinal cord injury paraplegia in Sprague-Dawley rats. *Biological research*, 55(1), 38. <https://doi.org/10.1186/s40659-022-00407-0>

**74.** Marchesini, M., Baciarello, M., Bellacicco, R., Flaviano, E., & Bignami, E. G. (2021). 24-Month Effectiveness of Periduosopic Adhesiolysis in Reducing the Use of Spinal Cord Stimulation in Patient With Chronic Lumbar Pain: A Possible Therapeutic Regimen? *Cureus*, 13(8), e17563. <https://doi.org/10.7759/cureus.17563>

a

n

i

- 75.** Hunter, C. W., Carlson, J., Yang, A., & Deer, T. (2018). Spinal Cord Stimulation for the Treatment of Failed Neck Surgery Syndrome: Outcome of a Prospective Case Series. *Neuromodulation: journal of the International Neuromodulation Society*, *21*(5), 495–503. <https://doi.org/10.1111/ner.12769>
- 76.** Farber, S. H., Han, J. L., Elsamadicy, A. A., Hussaini, Q., Yang, S., Pagadala, P., Parente, B., Xie, J., & Lad, S. P. (2017). Long-term Cost Utility of Spinal Cord Stimulation in Patients with Failed Back Surgery Syndrome. *Pain physician*, *20*(6), E797–E805. PMID: 28934786
- 77.** Roulaud, M., Durand-Zaleski, I., Ingrand, P., Serrie, A., Diallo, B., Peruzzi, P., Hieu, P. D., Voirin, J., Raoul, S., Page, P., Fontaine, D., Lantéri-Minet, M., Blond, S., Buisset, N., Cuny, E., Cadenne, M., Caire, F., Ranoux, D., Mertens, P., Naous, H., Simon, E., Emery, E., Gadan, B., Regis, J., Sol, J.C., Béraud, G., Debiais, F., Durand, G., Guetarni, Ging. F., Prévost, A., Brandet, C., Monlezun, O., Delmotte, A., d'Houtaud, S., Bataille, B., Rigoard, P. (2015). Multicolumn spinal cord stimulation for significant low back pain in failed back surgery syndrome: design of a national, multicentre, randomized, controlled health economics trial (ESTIMET Study). *Neuro-Chirurgie*, *61* Suppl 1, S109–S116. <https://doi.org/10.1016/j.neuchi.2014.10.105>
- 78.** Mishra, L. N., Kulkarni, G., & Gadgil, M. (2023). A novel current steering method for targeted spinal cord stimulation. *Frontiers in pain research (Lausanne, Switzerland)*, *4*, 1028368. <https://doi.org/10.3389/fpain.2023.1028368>
- 79.** Lo Bianco, G., Tinnirello, A., Papa, A., Marchesini, M., Day, M., Palumbo, G. J., Terranova, G., Di Dato, M. T., Thomson, S. J., & Schatman, M. E. (2023). Interventional Pain Procedures: A Narrative Review Focusing On Safety and Complications. PART 2 Interventional Procedures For Back Pain. *Journal of pain research*, *16*, 761–772. <https://doi.org/10.2147/JPR.S396215>
- 80.** Luz, A., Rupp, R., Ahmadi, R., & Weidner, N. (2023). Beyond treatment of chronic pain: a scoping review about epidural electrical spinal cord stimulation to restore sensorimotor and autonomic function after spinal cord injury. *Neurological research and practice*, *5*(1), 14. <https://doi.org/10.1186/s42466-023-00241-z>

- 81.** Baruah, S., & Banerjee, A. D. (2023). Paddle-Lead Spinal-Cord Stimulation Surgeries for Chronic Neuropathic Pain: A Single Surgeon Case-Series Outcome Analysis in Indian Population. *Asian journal of neurosurgery*, *18*(1), 150–156. <https://doi.org/10.1055/s-0043-1764121>
- 82.** Hayek, S. M., Veizi, E., & Hanes, M. (2015). Treatment-Limiting Complications of Percutaneous Spinal Cord Stimulator Implants: A Review of Eight Years of Experience From an Academic Center Database. *Neuromodulation: journal of the International Neuromodulation Society*, *18*(7), 603–609. <https://doi.org/10.1111/ner.12312>
- 83.** Noble, T., Boone, L., & El Helou, A. (2023). The role of virtual reality as adjunctive therapy to spinal cord stimulation in chronic pain: A feasible concept?. *Frontiers in pain research (Lausanne, Switzerland)*, *4*, 1094125. <https://doi.org/10.3389/fpain.2023.1094125>
- 84.** Gill, J. S., Kohan, L. R., Hasoon, J., Urits, I., Viswanath, O., Cai, V. L., Yazdi, C., Aner, M. M., Kaye, A. D., & Simopoulos, T. T. (2022). A Survey on the Choice of Spinal Cord Stimulation Parameters and Implantable Pulse Generators and on Reasons for Explantation. *Orthopedic reviews*, *14*(4), 39648. <https://doi.org/10.52965/001c.39648>
- 85.** Lee, J. M., Lee, D., Christiansen, S., Hagedorn, J. M., Chen, Z., & Deer, T. (2022). Spinal Cord Stimulation in Special Populations: Best Practices from the American Society of Pain and Neuroscience to Improve Safety and Efficacy. *Journal of pain research*, *15*, 3263–3273. <https://doi.org/10.2147/JPR.S372921>
- 86.** Medina, R., Ho, A., Reddy, R., Chen, J., & Castellanos, J. (2023). Narrative review of current neuromodulation modalities for spinal cord injury. *Frontiers in pain research (Lausanne, Switzerland)*, *4*, 1143405. <https://doi.org/10.3389/fpain.2023.1143405>
- 87.** Spinal Cord Injury Facts and Figures at a Glance. National Spinal Cord Injury Statistical Center. Updated (2020). Режим доступа: <https://www.nscisc.uab.edu/Public/Facts%20and%20Figures%202020.pdf> (Accessed August 24, 2022).

- 88.** Kumar, V., Prusik, J., Lin, Y., Hwang, R., Feustel, P., & Pilitsis, J. G. (2018). Efficacy of Alternating Conventional Stimulation and High Frequency Stimulation in Improving Spinal Cord Stimulation Outcomes: A Pilot Study. *Neuromodulation: journal of the International Neuromodulation Society*, 21(5), 466–471. <https://doi.org/10.1111/ner.12755>
- 89.** Miller, J. P., Eldabe, S., Buchser, E., Johaneck, L. M., Guan, Y., & Linderoth, B. (2016). Parameters of Spinal Cord Stimulation and Their Role in Electrical Charge Delivery: A Review. *Neuromodulation: journal of the International Neuromodulation Society*, 19(4), 373–384. <https://doi.org/10.1111/ner.12438>
- 90.** Linderoth, B., & Foreman, R. D. (2017). Conventional and Novel Spinal Stimulation Algorithms: Hypothetical Mechanisms of Action and Comments on Outcomes. *Neuromodulation: journal of the International Neuromodulation Society*, 20(6), 525–533. <https://doi.org/10.1111/ner.12624>
- 91.** Nagel, S. J., Wilson, S., Johnson, M. D., Machado, A., Frizon, L., Chardon, M. K., Reddy, C. G., Gillies, G. T., & Howard, M. A., 3rd (2017). Spinal Cord Stimulation for Spasticity: Historical Approaches, Current Status, and Future Directions. *Neuromodulation: journal of the International Neuromodulation Society*, 20(4), 307–321. <https://doi.org/10.1111/ner.12591>
- 92.** Aslan, S. C., Legg Ditterline, B. E., Park, M. C., Angeli, C. A., Rejc, E., Chen, Y., Ovechkin, A. V., Krassioukov, A., & Harkema, S. J. (2018). Epidural Spinal Cord Stimulation of Lumbosacral Networks Modulates Arterial Blood Pressure in Individuals With Spinal Cord Injury-Induced Cardiovascular Deficits. *Frontiers in physiology*, 9, 565. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.00565>
- 93.** Herrity, A. N., Williams, C. S., Angeli, C. A., Harkema, S. J., & Hubscher, C. H. (2018). Lumbosacral spinal cord epidural stimulation improves voiding function after human spinal cord injury. *Scientific reports*, 8(1), 8688. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26602-2>
- 94.** Reck, T. A., & Landmann, G. (2017). Successful spinal cord stimulation for neuropathic below-level spinal cord injury pain following complete paraplegia: a

- case report. *Spinal cord series and cases*, 3, 17049.  
<https://doi.org/10.1038/scsandc.2017.49>
- 95.** Harrison, C., Epton, S., Bojanic, S., Green, A. L., & FitzGerald, J. J. (2018). The Efficacy and Safety of Dorsal Root Ganglion Stimulation as a Treatment for Neuropathic Pain: A Literature Review. *Neuromodulation: journal of the International Neuromodulation Society*, 21(3), 225–233.  
<https://doi.org/10.1111/ner.12685>
- 96.** Harkema, S., Gerasimenko, Y., Hodes, J., Burdick, J., Angeli, C., Chen, Y., Ferreira, C., Willhite, A., Rejc, E., Grossman, R. G., & Edgerton, V. R. (2011). Effect of epidural stimulation of the lumbosacral spinal cord on voluntary movement, standing, and assisted stepping after motor complete paraplegia: a case study. *Lancet (London, England)*, 377(9781), 1938–1947.  
[https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(11\)60547-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(11)60547-3)
- 97.** Peña Pino, I., Hoover, C., Venkatesh, S., Ahmadi, A., Sturtevant, D., Patrick, N., Freeman, D., Parr, A., Samadani, U., Balser, D., Krassioukov, A., Phillips, A., Netoff, T. I., & Darrow, D. (2020). Long-Term Spinal Cord Stimulation After Chronic Complete Spinal Cord Injury Enables Volitional Movement in the Absence of Stimulation. *Frontiers in systems neuroscience*, 14, 35.  
<https://doi.org/10.3389/fnsys.2020.00035>
- 98.** Gorgey, A. S., Gill, S., Holman, M. E., Davis, J. C., Atri, R., Bai, O., Goetz, L., Lester, D. L., Trainer, R., & Lavis, T. D. (2020). The feasibility of using exoskeletal-assisted walking with epidural stimulation: a case report study. *Annals of clinical and translational neurology*, 7(2), 259–265.  
<https://doi.org/10.1002/acn3.50983>
- 99.** Anderson, M. A., Squair, J. W., Gautier, M., Hutson, T. H., Kathe, C., Barraud, Q., Bloch, J., & Courtine, G. (2022). Natural and targeted circuit reorganization after spinal cord injury. *Nature neuroscience*, 25(12), 1584–1596.  
<https://doi.org/10.1038/s41593-022-01196-1>
- 100.** Mohammad, N. S., Nazli, R., Zafar, H., & Fatima, S. (2022). Effects of lipid based Multiple Micronutrients Supplement on the birth outcome of underweight pre-

- ecclamptic women: A randomized clinical trial. *Pakistan journal of medical sciences*, 38(1), 219–226. <https://doi.org/10.12669/pjms.38.1.4396>
- 101.** Minassian, K., Bayart, A., Lackner, P., Binder, H., Freundl, B., & Hofstoetter, U. S. (2023). Rare phenomena of central rhythm and pattern generation in a case of complete spinal cord injury. *Nature communications*, 14(1), 3276. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39034-y>
- 102.** Angeli, C., Rejc, E., Boakye, M., Herrity, A., Mesbah, S., Hubscher, C., Forrest, G., & Harkema, S. (2023). Targeted Selection of Stimulation Parameters for Restoration of Motor and Autonomic Function in Individuals With Spinal Cord Injury. *Neuromodulation: journal of the International Neuromodulation Society*, S1094-7159(23)00148-4. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.neurom.2023.03.014>
- 103.** Steuer, I., & Guertin, P. A. (2019). Central pattern generators in the brainstem and spinal cord: an overview of basic principles, similarities and differences. *Reviews in the neurosciences*, 30(2), 107–164. <https://doi.org/10.1515/revneuro-2017-0102>
- 104.** Kathe, C., Skinnider, M. A., Hutson, T. H., Regazzi, N., Gautier, M., Demesmaeker, R., Komi, S., Ceto, S., James, N. D., Cho, N., Baud, L., Galan, K., Matson, K. J. E., Rowald, A., Kim, K., Wang, R., Minassian, K., Prior, J. O., Asboth, L., Barraud, Q., Lacour, S.P., Levine, A.J., Wagner, F., Bloch, J., Squair, J.W., Courtine, G. (2022). The neurons that restore walking after paralysis. *Nature*, 611(7936), 540–547. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05385-7>
- 105.** Hofstoetter, U. S., Danner, S. M., Freundl, B., Binder, H., Lackner, P., & Minassian, K. (2021). Ipsi- and Contralateral Oligo- and Polysynaptic Reflexes in Humans Revealed by Low-Frequency Epidural Electrical Stimulation of the Lumbar Spinal Cord. *Brain sciences*, 11(1), 112. <https://doi.org/10.3390/brainsci11010112>
- 106.** Pradat, P. F., Hayon, D., Blancho, S., Neveu, P., Khamaysa, M., & Guerout, N. (2023). Advances in Spinal Cord Neuromodulation: The Integration of Neuroengineering, Computational Approaches, and Innovative Conceptual

- Frameworks. *Journal of personalized medicine*, 13(6), 993. <https://doi.org/10.3390/jpm13060993>
- 107.** Tharu, N. S., Alam, M., Ling, Y. T., Wong, A. Y., & Zheng, Y. P. (2022). Combined Transcutaneous Electrical Spinal Cord Stimulation and Task-Specific Rehabilitation Improves Trunk and Sitting Functions in People with Chronic Tetraplegia. *Biomedicines*, 11(1), 34. <https://doi.org/10.3390/biomedicines11010034>
- 108.** van Nes, I. J. W., Rijken, H., Keijsers, N. L. W., Louwerens, J. W., & Nonnekes, J. (2023). Improved walking capacity after complementary ankle-foot surgery and gait training in a person with an incomplete tetraplegia; a case report. *Spinal cord series and cases*, 9(1), 22. <https://doi.org/10.1038/s41394-023-00579-1>
- 109.** Shackleton, C., Samejima, S., Williams, A. M., Malik, R. N., Balthazaar, S. J., Alrashidi, A., Sachdeva, R., Elliott, S. L., Nightingale, T. E., Berger, M. J., Lam, T., & Krassioukov, A. V. (2023). Motor and autonomic concomitant health improvements with neuromodulation and exercise (MACHINE) training: a randomised controlled trial in individuals with spinal cord injury. *BMJ open*, 13(7), e070544. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2022-070544>
- 110.** Samejima, S., Shackleton, C., McCracken, L., Malik, R.N., Miller, T., Kavanagh, A., Ghuman, A., Elliott, S., Walter, M., Nightingale, T.E., Berger, M.J., Lam, T., Sachdeva, R., Krassioukov, A.V. (2022) Effects of non-invasive spinal cord stimulation on lower urinary tract, bowel, and sexual functions in individuals with chronic motor-complete spinal cord injury: Protocol for a pilot clinical trial. *PLoS One*, 13;17(12), e0278425. [https:// DOI:10.1371/journal.pone.0278425](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0278425)
- 111.** Zhang, F., Momeni, K., Ramanujam, A., Ravi, M., Carnahan, J., Kirshblum, S., & Forrest, G. F. (2020). Cervical Spinal Cord Transcutaneous Stimulation Improves Upper Extremity and Hand Function in People With Complete Tetraplegia: A Case Study. *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering: a publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 28(12), 3167–3174. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2020.3048592>

- 112.** Wilson, J. R., Witiw, C. D., Badhiwala, J., Kwon, B. K., Fehlings, M. G., & Harrop, J. S. (2020). Early Surgery for Traumatic Spinal Cord Injury: Where Are We Now?. *Global spine journal*, 10(1 Suppl), 84S–91S. <https://doi.org/10.1177/2192568219877860>
- 113.** Nekhlopochyn, O. S., Verbov, V. V., Cheshuk, I. V., & Vorodi, M. V. (2021). Surgical management of traumatic irreducible spondyloptosis of thoracolumbar junction. *Ukrainian Neurosurgical Journal*, 27(2), 56–64. <https://doi.org/10.25305/unj.228926>
- 114.** Nekhlopochyn, O., Verbov, V., Tsymbaliuk, I., Vorodi, M., & Cheshuk, I. (2021). Neuropathic pain as a predictor of neurological disorders regression in patients with spinal cord traumatic injury. *PAIN, JOINTS, SPINE*, 11(3), 110–117. <https://doi.org/10.22141/2224-1507.11.3.2021.243047>
- 115.** Nekhlopochyn, O., Vorodi, M., & Cheshuk, I. (2022). AOSpine Thoracolumbar Spine Injury Classification System in determining the treating tactics of thoracolumbar junction traumatic injuries (literature review). *TRAUMA*, 23(2), 68–78. <https://doi.org/10.22141/1608-1706.2.23.2022.893>
- 116.** Nekhlopochyn, O., Cheshuk, Y., Vorodi, M., Tsymbaliuk, Y., Karpinskyi, M., & Yaresko, O. (2022). Biomechanical State of the Operated Thoracolumbar Junction in Lateroflexion. *TERRA ORTHOPAEDICA*, (2(113), 58-67. <https://doi.org/10.37647/0132-2486-2022-113-2-58-67>
- 117.** Nekhlopochyn, O., & Cheshuk, Y. (2022). Traumatic injuries of the thoracolumbar junction. Classification by Friedrich P. Magerl et al. *TRAUMA*, 23(3), 4–22. <https://doi.org/10.22141/1608-1706.3.23.2022.895>
- 118.** Nekhlopochyn, O. S., Verbov, V. V., Cheshuk, I. V., Vorodi, M. V., Karpinsky, M. Y., & Yaresko, O. V. (2023). The biomechanical state of the thoracolumbar junction with various options of transpedicular fixation under flexion load. *Ukrainian Neurosurgical Journal*, 29(2), 49–56. <https://doi.org/10.25305/unj.277152>

- 119.** Nekhlopochn, O., Verbov, V., Cheshuk, I., Karpinsky, M., & Yaresko, O. (2023). Mathematical modeling of variants of transpedicular fixation at the thoracolumbar junction after Th12 vertebrectomy during trunk backward bending. *Orthopedical traumatology and prosthetics*, (2), 43–49. <https://doi.org/10.15674/0030-59872023243-49>
- 120.** Komarov, M. P., Nekhlopochn, O. S., Verbov, V. V., Chernenko, O. H., Shmelova, A. A., Cheshuk, I. V., & Malysheva, T. A. (2023). Chondroblastoma of the cervical-thoracic junction: global data and own experience. *Ukrainian Neurosurgical Journal*, 29(3), 66–76. <https://doi.org/10.25305/unj.277910>
- 121.** Nekhlopochn, O. S., Verbov, V. V., Cheshuk, I. V., & Vorodi, M. V. (2023). Assessment of risk factors for the vertebral body kyphotic deformity progression in patients with type A1 injuries of the thoracolumbar junction. *Ukrainian Neurosurgical Journal*, 29(3), 26–33. <https://doi.org/10.25305/unj.278927>
- 122.** Nekhlopochn, O., Verbov, V., Cheshuk, I., & Vorodi, M. (2023). The value of the posterior ligamentous complex in traumatic injury of thoracolumbar junction. Part 1. Morphology and biomechanics. *TRAUMA*, 24(3), 12–20. <https://doi.org/10.22141/1608-1706.3.24.2023.950>
- 123.** Chay W, Kirshblum S. Predicting Outcomes After Spinal Cord Injury. *Phys Med Rehabil Clin N Am*. 2020 Aug;31(3):331-343. doi: 2020 May 26. DOI: [10.1016/j.pmr.2020.03.003](https://doi.org/10.1016/j.pmr.2020.03.003)

## ДОДАТКИ

### ДОДАТОК А

#### **Публікації, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:**

1. Nekhlopochyn, O. S., Verbov, V. V., Cheshuk, I. V., & Vorodi, M. V. (2021). Surgical management of traumatic irreducible spondyloptosis of thoracolumbar junction. *Ukrainian Neurosurgical Journal*, 27(2), 56–64. <https://doi.org/10.25305/unj.228926>  
(Особистий внесок здобувача полягає у вивченні та узагальненні літературних даних за проблемою, участі у проведенні оперативних втручань, отриманні результатів дослідження, їх узагальненні та інтерпретації, формуванні ілюстративного матеріалу, редагуванні тексту) ПОСТАВИТИ ВСЮДИ
2. Nekhlopochyn, O., Verbov, V., Tsymbaliuk, I., Vorodi, M., & Cheshuk, I. (2021). Neuropathic pain as a predictor of neurological disorders regression in patients with spinal cord traumatic injury. *PAIN, JOINTS, SPINE*, 11(3), 110–117. <https://doi.org/10.22141/2224-1507.11.3.2021.243047>
3. Nekhlopochyn, O., Vorodi, M., & Cheshuk, I. (2022). AOSpine Thoracolumbar Spine Injury Classification System in determining the treating tactics of thoracolumbar junction traumatic injuries (literature review). *TRAUMA*, 23(2), 68–78. <https://doi.org/10.22141/1608-1706.2.23.2022.893>
4. Nekhlopochyn, O., Cheshuk, Y., Vorodi, M., Tsymbaliuk, Y., Karpinskyi, M., & Yaresko, O. (2022). Biomechanical State of the Operated Thoracolumbar Junction in Lateroflexion. *TERRA ORTHOPAEDICA*, (2(113), 58-67. <https://doi.org/10.37647/0132-2486-2022-113-2-58-67>
5. Nekhlopochyn, O., & Cheshuk, Y. (2022). Traumatic injuries of the thoracolumbar junction. Classification by Friedrich P. Magerl et al. *TRAUMA*, 23(3), 4–22. <https://doi.org/10.22141/1608-1706.3.23.2022.895>

6. Nekhlopochn, O. S., Verbov, V. V., Cheshuk, I. V., Vorodi, M. V., Karpinsky, M. Y., & Yaresko, O. V. (2023). The biomechanical state of the thoracolumbar junction with various options of transpedicular fixation under flexion load. *Ukrainian Neurosurgical Journal*, 29(2), 49–56. <https://doi.org/10.25305/unj.277152>
7. Nekhlopochn, O., Verbov, V., Cheshuk, I., Karpinsky, M., & Yaresko, O. (2023). Mathematical modeling of variants of transpedicular fixation at the thoracolumbar junction after Th12 vertebrectomy during trunk backward bending. *Orthopedical traumatology and prosthetics*, (2), 43–49. <https://doi.org/10.15674/0030-59872023243-49>
8. Komarov, M. P., Nekhlopochn, O. S., Verbov, V. V., Chernenko, O. H., Shmelova, A. A. ., Cheshuk, I. V., & Malysheva, T. A. (2023). Chondroblastoma of the cervical-thoracic junction: global data and own experience. *Ukrainian Neurosurgical Journal*, 29(3), 66–76. <https://doi.org/10.25305/unj.277910>
9. Nekhlopochn, O. S., Verbov, V. V., Cheshuk, I. V., & Vorodi, M. V. (2023). Assessment of risk factors for the vertebral body kyphotic deformity progression in patients with type A1 injuries of the thoracolumbar junction. *Ukrainian Neurosurgical Journal*, 29(3), 26–33. <https://doi.org/10.25305/unj.278927>
10. Nekhlopochn, O., Verbov, V., Cheshuk, I., & Vorodi, M. (2023). The value of the posterior ligamentous complex in traumatic injury of thoracolumbar junction. Part 1. Morphology and biomechanics. *TRAUMA*, 24(3), 12–20. <https://doi.org/10.22141/1608-1706.3.24.2023.950>

#### **Апробація результатів проведеного дослідження:**

1. Tsymbaliuk IV, Nekhlopochn OS, Cheshuk IV. The effectiveness of NeySi 3M long-term Epidural Electrical Stimulation in patients with CRPS type 1. 16th World Congress on Spine & Orthopedics; September 21-22; London: Pulsus; 2022. p. 107.

2. Nekhlopochyn O, Verbov V, Tsymbaliuk I, Vorodi M, Cheshuk I. Some characteristics of pain in patients with chronic spinal cord injury. Global Spine Congress 2023; May 31- June 3; Prague: Global Spine Journal; 2023;13(2S). p. 538S-539S.
3. Nekhlopochyn O, Verbov V, Tsymbaliuk I, Vorodi M, Cheshuk I. Quality of life in patients with mild spinal cord injury after anterior subaxial cervical decompression-fusion surgery: one-year follow-up. Global Spine Congress 2023; May 31- June 3; Prague: Global Spine Journal; 2023;13(2S). p. 504S-505S
4. Nekhlopochyn O, Tsymbaliuk I, Verbov V, Cheshuk I, Vorodi M. Correlation of neuropathic pain intensity and neurological recovery in patients with spinal cord traumatic injury. Global Spine Congress 2023; May 31- June 3; Prague: Global Spine Journal; 2023;13(2S). p. 537S.
5. Nekhlopochyn O, Tsymbaliuk I, Verbov V, Vorodi M, Cheshuk I. Severity and type of traumatic subaxial cervical injury in prediction of neurological deficit. Global Spine Congress 2023; May 31- June 3; Prague: Global Spine Journal; 2023;13(2S). p. 507S-508S.
6. Nekhlopochin O, Verbov V, Cheshuk I, Vorodi M. Determining decision-making classification of traumatic thoracolumbar junction injuries. 18th World Congress of Neurosurgery; 4-8 Dec 2023; Cape Town, South Africa2023. p. 259.

**ДОДАТОК Б. Алгоритм застосування ЕЕС у пацієнтів з хребетно-спинномозковою травмою**

