МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет біоресурсів і природокористування
Кафедра агробіології та біохімії

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

освітній ступінь бакалавр

на тему: **РОЛЬ НЕЙРОПЛАСТИЧНОСТІ МОЗКУ У РЕАБІЛІТАЦІЇ ПІСЛЯ УРАЖЕНЬ ПЕРИФЕРИЧНИХ НЕРВІВ**

Виконав: студент IV курсу, 47 групи
Крилов Богдан Євгенович
Освітня програма Біологія
Спеціальності 091 Біологія
Керівник: к.е.н., доц. Манзій О.П.
Рецензент: к.б.н., доц. Курка С.С.

Умань – 2026

ЗМІСТ

Вступ 3

Розділ 1. ОСНОВИ НЕЙРОПЛАСТИЧНІСТІ МОЗКУ ТА ЗНАЧЕННЯ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ФУНКЦІЇ …….5

1.1. Поняття нейропластичності та структурно-функціональні особливості 5

1.2. Фізіологія передачі нервового імпульсу та роль нейромедіаторів.....11

1.3. Анатомо-фізіологічні особливості периферичної нервової системи.....14

1.4. Основні типи ушкодженнь периферичних нервів та їх вплив на нейропластичність 16

Розділ 2. НЕЙРОФІЗІОЛОГІЧНІ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНІ ЗМІНИ МОЗКУ В ПРОЦЕСІ НЕЙРОПЛАСТИЧНОСТІ ……21

2.1. Фізіологічні та молекулярні механізми нейропластичності при подвійній компресії периферичних нервів (на прикладі променевого нерва) .21

2.2. Методи реабілітації та їх вплив на нейропластичність мозку 25

2.3. Порівняльний аналіз ефективності методів 32

Розділ 3. ШЛЯХИ ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ СТИМУЛЯЦІЇ НЕЙРОПЛАСТИЧНІСТІ ……36

3.1. Апробація запропонованої моделі нейропластичної реабілітації на основі самоспостереження.....36

3.2. Удосконалення нейропластичної реабілітації на основі комбінованого підходу.....40

3.3. Статистичні дані щодо використання методів дослідження райдужки та звичних реакцій .....

ВИСНОВКИ.....43

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....45

ВСТУП

Актуальність теми. Нейропластичність мозку є одним із ключових механізмів, що забезпечують здатність нервової системи до відновлення після ушкоджень. У сучасній нейрофізіології та реабілітаційній медицині вона розглядається як основа відновлення функцій після уражень периферичних нервів, які часто призводять до порушення рухової активності, чутливості та зниження якості життя пацієнтів.

Актуальність теми зумовлена високою частотою травм периферичної нервової системи внаслідок виробничих, побутових або спортивних ушкоджень, а також складністю та тривалістю процесу відновлення. Вивчення ролі нейропластичності дає змогу глибше зрозуміти механізми компенсації функцій, формування нових нейронних зв'язків і перебудови кортикальних структур, що відкриває перспективи для вдосконалення методів нейрореабілітації[1].

Мета. З'ясувати роль нейропластичності мозку у процесі реабілітації після уражень периферичних нервів і визначити ефективні підходи до стимуляції цих механізмів.

У даній роботі використано аналіз сучасних наукових джерел, присвячених методам реабілітації, що базуються на принципах нейропластичності. Класичні методи фізичної терапії, які широко застосовуються в клінічній практиці, не є предметом детального розгляду, оскільки основна увага зосереджена на підходах, що мають специфічний вплив на нейронні мережі центральної нервової системи.

Об'єкт дослідження. Процеси нейропластичності мозку та периферичної нервової системи, що забезпечують відновлення сенсомоторних функцій верхньої кінцівки після ушкодження нервів.

Предмет дослідження. Механізми нейропластичності мозку та периферичних нервів, які лежать в основі відновлення рухових і сенсорних функцій при компресії або травмі периферичних нервів, а також вплив різних

методів реабілітації на активацію цих процесів.

Завдання дослідження. Проаналізувати сучасні наукові уявлення про нейропластичність мозку; охарактеризувати основні типи ушкоджень периферичних нервів і їхній вплив на центральну нервову систему; дослідити вплив реабілітаційних методик (фізіотерапії, кінезіотерапії, нейромодуляції) на процеси нейропластичності; визначити можливості оптимізації реабілітаційних програм шляхом цілеспрямованої активації нейронних механізмів відновлення. Таким чином, вивчення нейропластичності як фундаментальної основи нейрореабілітації має важливе теоретичне і практичне значення для підвищення ефективності відновлення функцій після уражень периферичних нервів.

Наукова новизна та теоретичне значення. Робота дає можливість систематизувати сучасні уявлення про нейропластичність мозку та периферичних нервів у контексті відновлення сенсомоторних функцій верхньої кінцівки.

Теоретичне значення. Полягає у формуванні комплексного уявлення про взаємодію центральних і периферичних механізмів відновлення та їхню роль у реабілітації.З Важливим аспектом є також встановлення взаємозв’язку між рівнем прояву нейропластичності й клінічними результатами реабілітації пацієнтів. Завершальним завданням є узагальнення отриманих даних для формування практичних рекомендацій, спрямованих на підвищення ефективності реабілітаційних заходів після уражень периферичних нервів.

Практичне значення. Отримані результати дозволяють розробляти більш ефективні реабілітаційні програми, включаючи фізичну терапію, сенсорну стимуляцію та кінезіотерапію, спрямовані на активізацію нейропластичних процесів у мозку.

РОЗДІЛ 1
ОСНОВИ НЕЙРОПЛАСТИЧНІСТІ МОЗКУ ТА ЗНАЧЕННЯ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ФУНКЦІЇ

1.1. Поняття нейропластичності та структурно-функціональні особливості мозку

Нейропластичність – це властивість нервової системи пристосовуватися до змін внутрішнього й зовнішнього середовища шляхом перебудови своєї структури та функцій [1,8]. Саме завдяки цій здатності мозок забезпечує навчання, формування пам’яті, адаптацію до нових умов і часткове відновлення після ушкоджень. Раніше вважалося, що після завершення дитячого розвитку мозок залишається майже незмінним, однак сучасні дослідження довели, що його пластичні можливості зберігаються впродовж усього життя [1],[5]

Цікавість до нейропластичності почав активно формуватися ще в XIX столітті, коли переважала думка про статичність мозку дорослої людини. Сантьяго Рамон-і-Кахаль дотримувався погляду, що нервові клітини після завершення розвитку не відновлюються, а будова мозку є сталою. Водночас Вільям Джеймс наприкінці XIX століття висунув ідею, що досвід і навчання здатні змінювати мозкову організацію. Згодом Карл Лешлі, аналізуючи пам’ять, показав, що функції мозку можуть частково перерозподілятися між різними його зонами, що стало важливим кроком до розуміння компенсаційних механізмів [9].

У 1949 році Дональд Гебб сформулював принцип, відповідно до якого одночасна активність нейронів посилює зв’язок між ними. Саме ця ідея стала основою сучасних уявлень про синаптичну пластичність. У 1960-х роках відкриття довготривалої потенціації в гіпокампі експериментально підтвердило, що синаптичні зв’язки можуть надовго змінювати свою силу [9].

Пізніше було доведено існування нейрогенезу в мозку дорослої людини, що остаточно спростувало уявлення про повну незмінність нервової системи. Розвиток нейровізуалізаційних методів у XXI столітті дав змогу спостерігати ці процеси безпосередньо, зокрема під час навчання, після травм та інсультів.

Нейропластичність виявляється на кількох рівнях організації нервової системи [4]: молекулярному, клітинному, синаптичному та корковому. На молекулярному рівні вона пов’язана зі змінами експресії генів і синтезу білків, які беруть участь у формуванні нових контактів між нейронами [2]. На клітинному рівні відбувається перебудова форми нейронів, зокрема дендритів, і розвиток нових зв’язків. Синаптична пластичність, до якої належать довготривале підсилення та довготривале послаблення, визначає, наскільки ефективно нейрони передають сигнали один одному у відповідь на активність [40].

Особливого значення нейропластичність набуває при ушкодженнях периферичних нервів, парезах, компресії нервових стовбурів або їх розривах. У таких випадках мозок здатний частково компенсувати втрачений сенсорний чи руховий контроль завдяки перебудові суміжних ділянок коркової карти. Саме цей механізм лежить в основі фізичної терапії, сенсомоторного тренування та інших реабілітаційних підходів, спрямованих на відновлення функцій.

Нейропластичність проявляється у кількох основних механізмів, яка реалізує подальші процеси у мозку:

Синаптична пластичність пов’язана зі зміною сили та ефективності передавання сигналів між нейронами.

Структурна пластичність полягає у формуванні нових нейронних відростків, насамперед аксонів і дендритів.

Функціональна пластичність, у свою чергу, виявляється в перерозподілі активності між різними ділянками мозку або нервової системи, що дає змогу частково компенсувати порушені функції наприклад після інсульту [2, 3].

Пластичні властивості центральної та периферичної нервової системи

мають спільну основу, однак реалізуються по-різному.

Центральна нервова система характеризується високою здатністю до синаптичних перебудов і функціональної адаптації, що є важливим для навчання, формування пам'яті та пристосування до наслідків ушкоджень. Водночас відновні можливості її нейронів залишаються обмеженими через дію гліального бар'єра, наявність інгібуючих компонентів мієліну та невисоку здатність клітин до проліферації.

Периферична нервова система демонструє значно кращий потенціал до регенерації та структурного оновлення. Після ушкодження периферичних нервів аксони можуть відростати заново завдяки клітинам Шванна, які не лише формують мієлінову оболонку, а й виділяють нейротрофічні фактори та створюють сприятливі канали для спрямованого росту аксона.

Головний мозок людини є надзвичайно складною багаторівневою системою, що об'єднує мільярди нейронів і нейрогліальних клітин.

Саме їхня взаємодія забезпечує виконання сенсорних, рухових, когнітивних та емоційних функцій. Здатність мозку до змін у структурі й роботі формується завдяки особливостям його анатомічної організації та тісним зв'язкам між окремими відділами.

Основні структурні відділи мозку:

1. Кора великих півкуль (*Cerebral cortex*). Відповідає за свідомі рухи, сенсорне сприйняття, когнітивні функції та мову.

Пластичність кори дозволяє переналаштовувати рухові та сенсорні карти після травми або інсульту [2,6].

2. Базальні ганглії (*Basal ganglia*). Відповідають за координацію рухів, навчання моторики та автоматизацію навичок.

Під час реабілітації допомагають відновлювати контроль рухів і відпрацьовувати нові моторні стратегії.

3. Таламус (*Thalamus)*. Центральний релейний центр сенсорної інформації. Допомагає переналаштовувати сенсорні шляхи після пошкоджень, покращуючи відчуття та пропріоцепцію

4.Мозочок (*Cerebellum*). Відповідає за координацію рухів, рівновагу, точність та часову синхронізацію моторних актів. Завдяки високій нейропластичності мозочок відіграє важливу роль у моторному навчанні та адаптації рухів під час відновлення після неврологічних порушень.

5.Лімбічна система (*Limbic system*). Включає гіпокамп, мигдалеподібне тіло та інші структури, що регулюють емоції, пам’ять і мотивацію. Пластичність лімбічної системи забезпечує формування нових асоціативних зв’язків і відіграє важливу роль у когнітивній та психологічній реабілітації[6].

Як показано на рисунку (рис. 1,1) нейропластичність мозку реалізується у двох взаємопов’язаних формах, що адаптуються і змінюються з часом.

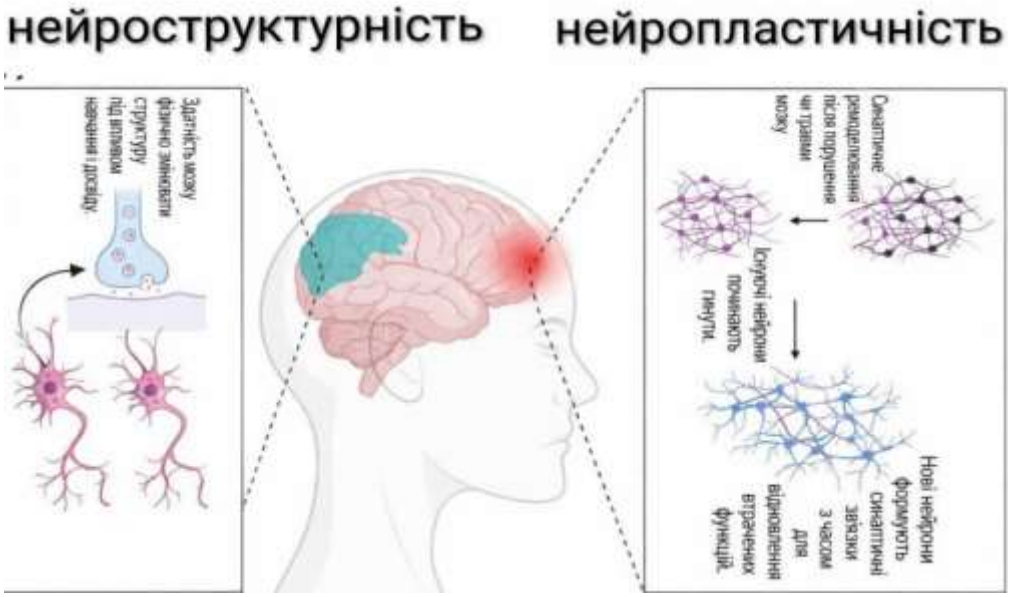


Рис. 1.1 Схема різниця між нейроструктурністю і нейропластичністю мозку (Нейроструктурність = зміна “будови" .Нейропластичність = зміна “роботи”).

1. Нейроструктурність – це здатність мозку змінювати свої нейронні зв’язки. Це природний процес, за якого формуються нові нейрони та встановлюються синаптичні контакти з уже існуючими нейронними мережами. Найактивніше така пластичність проявляється у ранньому дитинстві, коли мозок швидко збільшує кількість нейронів і синапсів під впливом навчання, досвіду та формування пам’яті.

Наприклад, коли дитина опановує ходьбу або мову, її мозок адаптується до нової інформації, створюючи нові нейронні шляхи.

При народженні один нейрон у головному мозку має приблизно 2500 синапсів, а до трьох років їх кількість зростає до 15 000 у результаті накопичення досвіду та знань. Ця висока здатність до адаптації пояснює, чому діти легко засвоюють нові навички, такі як мова, технічні вміння чи координація рухів [35].

З віком нейропластичність знижується. У дорослих кількість синапсів приблизно вдвічі менша, ніж у дітей, оскільки відбувається синаптична обрізка – зникнення рідко використовуваних контактів.

Проте це не означає, що мозок дорослого повністю втрачає здатність до змін.

2. Функціональна пластичність - відбувається в наслідок травм, різних областей ділянок ЦНС .

У значно обмеженому масштабі перебудова нейронних зв’язків спостерігається, зокрема, у гіпокампі та нюховій цибулині, які відповідають за пам’ять і нюх.

Дослідження Мечеллі та співавт.[35] показали, що у дорослих, які вивчають другу мову, збільшується щільність сірої речовини, причому рівень змін корелює з досягнутою мовною вправністю та віком початку навчання. Якщо ж мова не використовується регулярно, синапси поступово відмирають і можуть бути втрачені назавжди[35].

Це пояснюється принципом нейропластичності мозку і законом «використовуй або втратиш» (use it or lose it).

Тобто дослідження показує: мозок адаптується під нові навички, але ця адаптація зберігається лише за регулярного використання.

Розглянемо відділи кори головного мозку, які відповідають і дають чітку характеристику функціональних можливостей в реабілітації нервів Рис. (1.2) Схема на якій зображені відділи мозку:

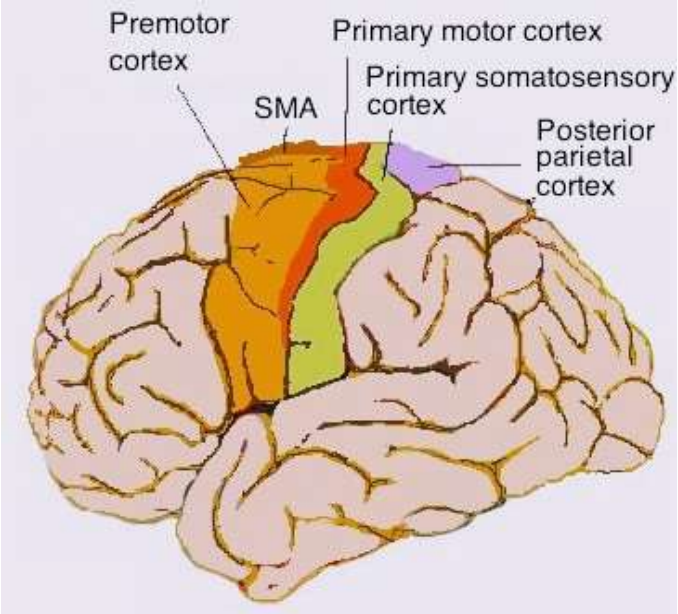


Рис. 1.2 Основні відділи мозку які відіграють роль у функціональній компетенції

1.Моторна кора (*Primary Motor Cortex, M1*) - контролює добровільні рухи протилежної кінцівки, нейропластичність дозволяє перебудовувати карти рухів для компенсації слабкості м'язів.

2. Передня моторна кора (*Premotor) і Supplementary Motor Area* (SMA) - планують рухи, координують м'язову діяльність і забезпечують виконання складних послідовностей. Допомагають компенсувати контроль при ураженні основного нерва[7].

3. Соматосенсорна кора (*Primary Somatosensory Cortex, S*1) - отримує інформацію про дотик, температуру та пропріоцепцію.

Сенсорна стимуляція активує S1, що сприяє точності рухів і відновленню сенсорного зворотного зв'язку.

4. Базальні ганглії та мозочок - забезпечують точність, ритмічність та плавність рухів, коригують помилки під час виконання дій.

5. Таламус - виконує роль сенсорного «фільтра» та координатора, забезпечуючи зворотний зв'язок і формування нових нейронних зв'язків.[6,7]

Таким чином, мозок виконує структурну і функціональну компенсацію:

1. Структурна - перебудова M1, *Premotor,* SMA → відновлення

добровільних рухів; S1 + таламус → сенсорна підтримка; мозочок + базальні ганглії → координація і плавність рухів.

2. Функціональна - перенаправлення контролю на сусідні м’язи для забезпечення виконання рухів, що прискорюється при активній реабілітації (сенсорика, дзеркальна терапія, повторювані вправи).

1.2. Фізіологія передачі нервового імпульсу та роль нейромедіаторів

У структурі головного мозку нейрони взаємодіють через синапси – функціональні та морфологічні одиниці передачі нервових сигналів, які є основою нейронних мереж, процесів навчання, пам’яті та нейропластичності .

Передача нервового імпульсу є ключовим процесом функціонування центральної та периферичної нервової системи.

Нейрони взаємодіють через синапси – спеціалізовані структури, що забезпечують передачу інформації від одного нейрона до іншого або до ефекторних клітин (м’язових волокон, залоз). Цей процес є основою нейропластичності, навчання, пам’яті та відновлення функцій після ушкоджень периферичних нервів.

Саме на рівні синапсу відбувається ключова регуляція нервової передачі, яка визначає ефективність нейронних зв’язків і лежить в основі процесів нейропластичності, навчання та відновлення функцій після ушкодження периферичних нервів [8].



Рис 1.3 Схематичне зображення хімічного синапса

На рисунку 1.3 зображено будову хімічного синапсу та його роль у процесі реабілітації периферичного нерва. Синапс є ключовою ланкою передачі інформації між нейронами і визначає ефективність відновлення сенсомоторних функцій після ушкодження нервових волокон.

Також важливим механізмом є синаптична пластичність- це здатність синапсів змінювати свою ефективність передачі сигналу у відповідь на активність (посилюватися або послаблюватися).

У пресинаптичному нейроні надходження нервового імпульсу призводить до відкриття кальцієвих каналів, входу іонів Ca^{2+} та вивільнення нейромедіаторів. Під час реабілітації регулярна активація нейронів за рахунок активних рухів і сенсорної стимуляції підвищує ефективність синаптичної передачі та стабілізує новоутворені синаптичні контакти.

Синаптична щілина забезпечує хімічну передачу сигналу між нейронами. Після ураження периферичного нерва зменшується інтенсивність аферентних імпульсів до ЦНС, що послаблює синаптичну передачу, тоді як реабілітаційні втручання сприяють її відновленню та функціональній перебудові нейронних мереж.

На постсинаптичній мембрані нейромедіатори взаємодіють зі специфічними рецепторами, викликаючи збуджувальні або гальмівні потенціали. Зміна чутливості та щільності рецепторів є проявом синаптичної пластичності, що лежить в основі довготривалого підсилення синапсів і повторного включення ослаблених м’язів у рухові програми.

Баланс між збуджувальними та гальмівними нейромедіаторами має вирішальне значення для адаптивної нейропластичності. Контрольована реабілітація сприяє перебудові моторних карт мозку, тоді як відсутність цілеспрямованого впливу може призвести до патологічних проявів, зокрема спастичності або хронічного болю.

Синапси розташовані в усіх відділах головного мозку і є основними місцями взаємодії між нейронами. Найбільша їх концентрація спостерігається:

- у корі великих півкуль – між пірамідними нейронами моторної,

сенсорної та асоціативної кори; саме тут формуються рухові програми та сенсорне сприйняття.

- у підкіркових структурах (таламус, базальні ганглії) – забезпечують інтеграцію, координацію та автоматизацію рухів.

- у мозочку – синапси клітин Пуркіньє та гранулярних нейронів відповідають за точність, синхронність і корекцію рухів.

- у стовбурі мозку – регулюють тонус м'язів, рефлекси та вегетативні функції

-у спинному мозку – забезпечують первинну обробку сенсорної інформації та формування рефлекторних відповідей.

Сучасна реабілітація цілеспрямовано впливає на синапси:

Основні механізми:

- стимуляція Ca^{2+}-залежної передачі;

- модуляція нейромедіаторних систем;

- посилення LTP і пригнічення патологічного LTD.

Приклад при компресії нерва:

Рання сенсорна активація → запобігає втраті синапсів у корі; ритмічна стимуляція → синхронізація нейронних ансамблів; фармакологічна підтримка → підвищення ефективності синаптичної передачі.

Розглянути основні етапи реабілітації , та функціонального стану в таблиці додатку А, на прикладі при компресії периферичного нерва та стан синаптичної передачі .

Що відбувається при компресії променевого нерва (вихідна точка)

(n. radialis) яка призводить до:

- зниження проведення імпульсу до розгиначів кисті та пальців;

- втрати сенсорного зворотного зв'язку з тильної поверхні кисті;

- зменшення аферентного потоку до соматосенсорної кори (S1);

- ослаблення еферентної активності моторної кори (M1).

Наслідок: у мозку починається синаптичне "мовчання" – активні раніше синапси в моторних і сенсорних зонах втрачають регулярну активацію.

Тому цю клінічну картину пояснює чому рання активізація ефективніша за тривалий спокій; дзеркальна терапія працює навіть без руху; уявні рухи активують ті самі синапси М1.

1.3 Анатомо-фізіологічні особливості периферичної нервової системи

Мікроструктура нерва. Основу становлять нервові волокна (fibrae nervosae), які є аксонами нейронів (*axon*), оточеними оболонками[6].

Частина волокон має мієлінову оболонку (*vagina myelin*і), що утворюється шваннівськими клітинами (*neurolemmocyti*). Мієлін забезпечує швидке, сальтаторне проведення імпульсу, що критично важливо для точної часової координації сигналів, які надходять до центральної нервової системи[6].

Безмієлінові волокна проводять імпульси повільніше, однак відіграють значну роль у передачі вегетативних і больових сигналів, формуючи специфічні патерни аферентації, що також впливають на перебудову нейронних мереж[7].

Периферичний нерв має багаторівневу організацію, представлену трьома оболонками:

- Ендоневрій (*endoneurium*) – оточує окремі нервові волокна, забезпечуючи їх трофіку та мікрооточення.

- Періневрій (*perineurium*) – формує пучки (*fasciculi*) і виконує бар'єрну функцію, підтримуючи стабільність внутрішнього середовища.

- Епіневрій (*epineuriu*m) – зовнішня оболонка, що захищає нерв і містить судини (*vasa nervorum*).

Така організація не лише забезпечує механічний захист, але й створює умови для спрямованої регенерації аксонів після ушкодження, що є критичним фактором відновлення функції.

До складу периферичного нерва входять різні типи волокон:

- Аферентні (fibrae afferentes) – передають сенсорну інформацію від рецепторів до ЦНС.

- Еферентні (fibrae efferentes) – проводять імпульси до ефекторів (м’язів, залоз).

- Вегетативні (fibrae autonomicae) – регулюють діяльність внутрішніх органів.

Особливу роль у контексті нейропластичності відіграють аферентні волокна, оскільки саме вони формують сенсорний потік, який визначає рівень активації кортикальних структур.

Регенераційний потенціал периферичного нерва. На відміну від центральної нервової системи, периферичні нерви мають здатність до регенерації. Після ушкодження відбувається валлерівська дегенерація (degeneratio Walleriana) дистального сегмента, після чого запускається процес відновлення.

Шваннівські клітини (neurolemmocyti) відіграють ключову роль: фагоцитують залишки зруйнованих структур, утворюють провідні канали для росту аксона, виділяють нейротрофічні фактори

Ріст аксона відбувається зі швидкістю приблизно 1–3 мм на добу, однак функціональне відновлення залежить від точності реіннервації.

Анатомічна цілісність і функціональний стан периферичного нерва безпосередньо визначають характер імпульсації, що надходить до мозку. При ушкодженні нерва:

1. Аферентні шляхи як тригер нейропластичності.Анатомічна основа :

- Рецептори (механорецептори, ноцицептори, пропріорецептори)

- Чутливі нейрони спинномозкових гангліїв

- Висхідні провідні шляхи

- Функціональне значення

- Аферентний потік (після інтенсивного тренування збільшується представництво кисті в соматосенсорній корі)

- Еферентні шляхи і моторна пластичність

2. Мієлінізація і швидкість проведення імпульсів, та фізіологічна особливость

- Синхронність активації нейронів
- Висока швидкість → точна часовóва координація

3. Регенерація ПНС як пусковий механізм перебудови ЦНС. Наявні такі структури які впливають на регенерацію:

- Шваннівські клітини
- Аксональна регенерація
- Відновлення периферичного нерва

4.Сенсомоторна інтеграція як основа пластичност .ПНС забезпечує безперервний цикл:

Рецепція → Передача → Обробка → Відповідь → Зворотний зв'язок. Цей цикл формує:

- адаптацію рухів
- навчання рухів
- автоматизацію(без цього циклу нейропластичність неможлива)

5. Клінічний аспект (дуже важливо)

При ушкодженні ПНС:

- ↓ аферентації → деградація кортикальних зон порушення рухового контролю

При відновленні:

- активується нейропластичність, можливе часткове або повне відновлення функції

1.4 Основні типи ушкодженнь периферичних нервів та їх вплив на нейропластичність

Периферичні нерви можуть зазнавати різних ушкоджень, які відрізняються механізмом і тяжкістю. До основних типів ушкоджень відносять:

1.Нейропраксію – тимчасове порушення провідності без структурної втрати аксона.

2.Аксонотмезію – пошкодження аксона з збереженням нервової оболонки.

3.Нейротмезію – повний розрив нервового стовбура який виникає при травмах.

Кожен із цих видів ушкоджень по-різному впливає на сенсомоторні функції та активність центральної нервової системи.

Особливе значення у клінічній практиці має компресійне ушкодження нервів, яке частіше зустрічається в спорті такому як (армреслінгу) також важка атлетика, і має найлегший ступінь тяжкості пошкодження що виникає при тривалому механічному тиску на нервове волокно.

З цих трьох типів ушкоджень нейропластичність проявляє найбільшу ефективність при нейропраксії, меншою мірою – при аксонотмезії, і майже не працює при нейротмезії без хірургічного втручання, тому розглядати будемо детальніше саме її.

Компресія нерва призводить до демієлінізації, уповільнення проведення нервових імпульсів і, у випадках хронічного впливу, до аксональної втрати. Найчастіше це проявляється зниженням сили м’язів, порушенням чутливості, парестезіями та ослабленням афер ентного потоку до соматосенсорної кори.

Одним із цікавих варіантів компресії для аналізу симптомів, які одночасно дозволяють побачити всю проблему, є дабл краш (подвійна компресія). Тому така компресія дає можливість зрозуміти, що є кілька рівнів ураження нерву, а не одна причина.

Як модель для аналізу структурно-функціональних особливостей периферичних нервів верхньої кінцівки, обрано анатомічну структуру - променевий нерв.

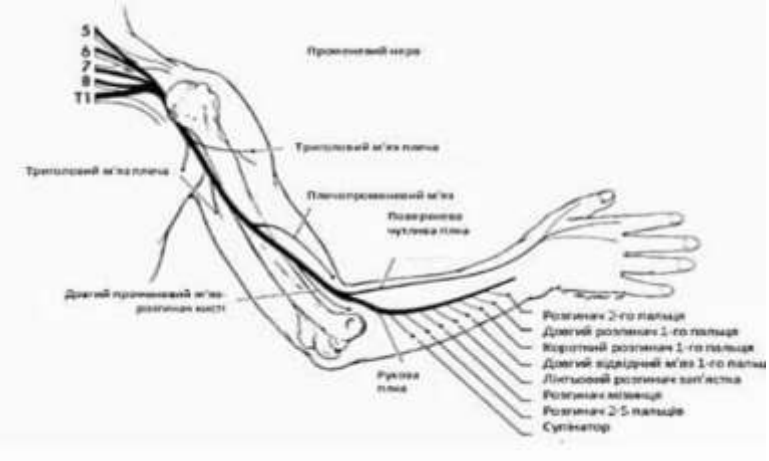
Пошкодження периферичних нервів (ППН) зазвичай виникають внаслідок ушкодження периферичного нервового сплетіння, нервового стовбура під впливом зовнішніх факторів, таких як розтягнення, поріз,

здавлення, вогнепальне поранення тощо.

Дослідження, проведені канадськими вченими, показали, що серед пацієнтів з травмами річна частота неврологічних ушкоджень коливалася від 0,8 до 3,6% і частіше зустрічалася у молодих чоловіків (1). У Великій Британії середня частота ПНН становила 11,2 (95% ДІ 10,9–11,6) випадків на 100 000 осіб на рік (2). У Сполучених Штатах у 2,6% пацієнтів з посттравматичними ушкодженнями діагностували ушкодження нервів верхніх кінцівок, а у 1,2% – ушкодження нервів нижніх кінцівок (3). У більшості з цих випадків (90,8 %) спостерігалося ушкодження одного нерва, у 8,2 % – двох різних нервів, і лише в 1 % – ушкодження двох і більше нервів. У Китаї щорічно реєструється 600 000–900 000 випадків ушкодження периферичних нервів [20].

Епідеміологічне дослідження ушкоджень периферичних нервів верхніх кінцівок у Південній Кореї за період 2008–2018 рр. показало, що серед ушкоджень периферичних нервів кінцівок найчастішими були ушкодження ліктьового, серединного, променевого, сідального нерва та загального малогомілкового нерва. Пошкодження кінцівок становили 60–70 % від усіх випадків. Серед пошкоджень периферичних нервів найпоширенішими були пошкодження пальцевих нервів, за якими слідували пошкодження променевого, ліктьового та серединного нервів[20].

Променевий нерв – великий периферичний нерв верхньої кінцівки, що походить із заднього пучка плечового сплетення (волокна C5–Th1) і проходить по задній поверхні плеча, спіральній борозні плечової кістки, далі ділиться на глибоку (posterior interosseous) і поверхневу гілки, які іннервують розгиначі передпліччя та тильну сторону кисті. На рис. 2.2



Особливе анатомічне розташування променевого нерва є робить його доволі вразливим до зовнішніх чи внутрішніх факторів .

Довгий і звивистий хід. Він проходить по задній поверхні плеча у спіральній борозні плечової кістки, потім крізь супінаторний канал передпліччя і ділиться на поверхневу та глибоку гілки. Таке «звивисте» розташування робить нерв схильним до стискання і розтягування при рухах плеча та ліктя

Вивчення впливу ушкоджень периферичних нервів, зокрема компресійних, на нейропластичність мозку є важливим для розробки реабілітаційних стратегій. Активація сенсомоторних шляхів через фізичну терапію, кінезіотерапію або нейростимуляцію сприяє відновленню ефективності синаптичної передачі та формуванню компенсаторних нейронних зв’язків. Це підкреслює ключову роль нейропластичності як механізму адаптації та відновлення функцій після пошкодження периферичних нервів.

Нейропластичність є фундаментальною властивістю центральної нервової системи, що забезпечує здатність мозку змінювати структуру та функції у відповідь на навчання, досвід або ушкодження.

Водночас варто враховувати, що ефективність цих компенсаторних

механізмів значною мірою залежить від характеру та локалізації ураження нервової системи.

Зокрема, при явищі подвійної компресії (дабл краш), коли нерв піддається здавленню на двох рівнях, компенсаторні можливості мозку та нервової системи можуть бути обмежені через сукупний вплив кількох патологічних факторів. Саме тому аналіз таких станів потребує комплексного підходу, що поєднує розуміння нейропластичності та механізмів периферичних уражень, що буде розглянуто у наступному розділі.

РОЗДІЛ 2
НЕЙРОФІЗІОЛОГІЧНІ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНІ ЗМІНИ МОЗКУ В ПРОЦЕСІ НЕЙРОПЛАСТИЧНОСТІ

2.1 Фізіологічні та молекулярні механізми нейропластичності при подвійній компресії периферичних нервів (на прикладі променевого нерва)

Подвійна компресія нерва (Double Crush) виникає, коли один і той самий нерв зазнає ушкодження на двох рівнях: проксимальному і дистальному. В результаті це може порушувати провідність нервових імпульсів і посилювати симптоми пошкодження.

A. R. Upton і A. J. McComas у 1973 році описали концепцію double crush: перша (проксимальна) компресія порушує осьовий (*axoplasmic*) транспорт і «підсаджує» нейрон – через це навіть невелика дистальна компресія дає набагато сильніші симптоми. Це фундаментальна ідея, яка пояснює, чому одночасне ураження ліктя й зап’ястя дає тяжчі або несподівані симптоми.

Розглянемо як саме здійснюється функціональна реорганізація звязків у мозку, що представлена на схемі (концепція double crush) рис2.1, також переналаштування карт рухів.



Рис. 2.1 Перепраграмування мозку при подвійній компресіїї

Механізми нейропластичності можна розділити за рівнем організації, що належить до обох рівнів, але переважно це фізіологічні механізми з молекулярною основою:

Компресія нерва → запускає + дезінгібіцію + синаптичну пластичність → кортикальне перекартування → структурні зміни → функціональна реорганізація[5].

Це відображає основні механізми, через які реалізується нейропластичність, а також етапи нейропластичної відповіді на периферичне ушкодження нерва:

Перший етап – виникнення подвійної компресії ліктьового нерва на рівні ліктьового (cubital tunnel) та зап'ясткового каналів. Це призводить до порушення аксональної провідності, що проявляється зниженням швидкості та амплітуди нервового імпульсу. Розвивається часткова деаферентація (зменшення сенсорного входу) та явища денервації м'язів.

Другий етап – порушення сенсомоторної інтеграції. Внаслідок зниження аферентного потоку до первинної соматосенсорної кори (S1) погіршується точність сенсорної репрезентації кисті. Одночасно у первинній моторній корі (M1) знижується ефективність еферентного виходу, що проявляється зменшенням сили, точності та селективності рухів. Це відповідає стадії ослаблення сенсомоторного зв'язку.

Третій етап – компенсаторна коркова активація. У відповідь на деаферентацію відбувається зниження гальмівного впливу (зокрема GABA-ергічного), що сприяє активації латентних нейронних зв'язків. У межах M1 розширюються зони представництва за рахунок сусідніх ділянок (передпліччя та проксимальних відділів). Підвищується активність премоторної кори (PMC) та додаткової моторної зони (SMA), які частково компенсують зниження моторного виходу. У S1 спостерігається перекриття сенсорних полів. Також залучаються тім'яні асоціативні ділянки (сенсомоторна інтеграція), мозочок (координація та корекція рухів) і базальні ганглії (регуляція моторного контролю).

Четвертий етап – переналаштування кортикальних карт (cortical remapping). Завдяки механізмам синаптичної пластичності (довготривала потенціація та депресія – LTP/LTD), а також аксональному спраутингу формуються нові нейронні зв’язки. Відбувається перебудова соматотопічної організації кори, при якій представництво кисті стає менш чітким і частково зміщується.

П’ятий етап – функціональна реорганізація. Формується нова модель моторного контролю, яка дозволяє частково компенсувати порушення нервової провідності. Рухові функції зберігаються, однак можуть характеризуватися зниженням точності, координації та підвищеним залученням додаткових моторних структур.

На рисунку 2.2 представлено схематичний графік механізму нейропластичності мозку. Зі збільшенням часу навчання або стимуляції спостерігається поступове підвищення ефективності синаптичної передачі між нейронам.

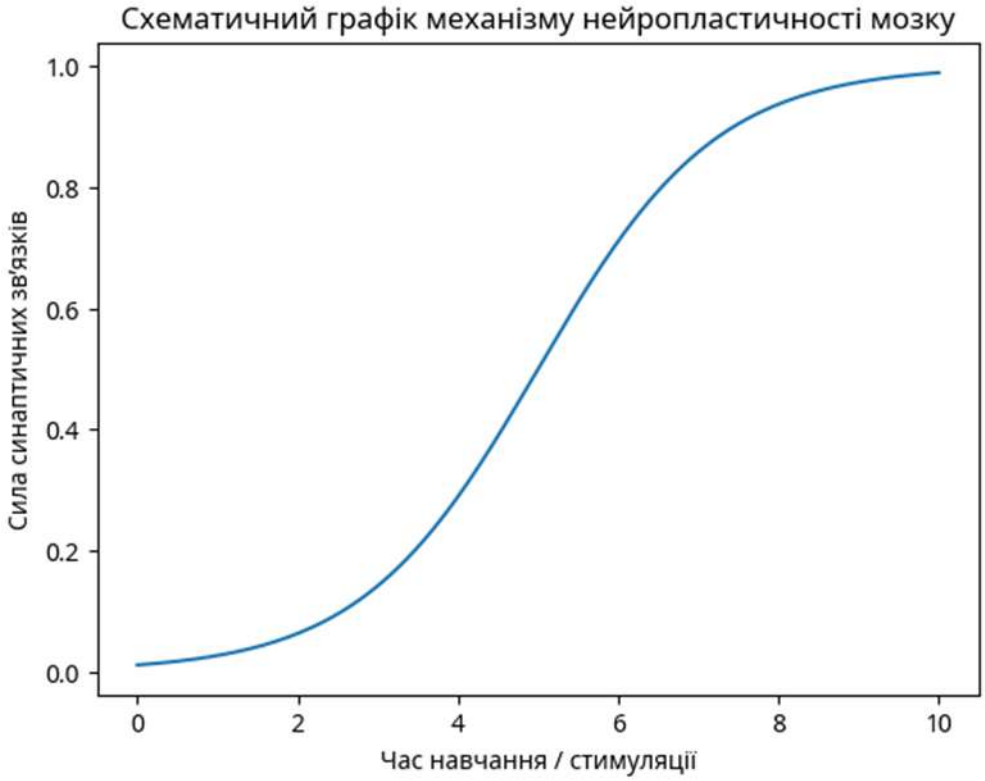


Рис 2.2. Динаміка змін сили синаптичних зв’язків у процесі нейропластичності.

На початковому етапі зміни є мінімальними, що відповідає періоду адаптації нервової системи до нового стимулу. У міру продовження впливу відбувається активація нейронних мереж, посилюється синаптична передача, формуються нові або зміцнюються існуючі нейронні зв’язки.

І можна сказати що ці процеси програмування здійснюється таким механизм як синаптичга пластичність, структурна та функціональна пластичність на прикладі графіку (рис 2.2).

Тут чітко показані плавні переходи самого процесу від активізації до таких як активна реакція , потім фаза стабілізації.

Графік показує, як працює нейропластичність мозку під час навчання або повторної стимуляції.

Вісь X – Час навчання / стимуляції. Це кількість часу або повторень:

- навчання

- тренування

- отримання нового досвіду

Чим більше повторень, тим сильніше мозок адаптується.

Вісь Y – Сила синаптичних зв’язків. Це показник того, наскільки сильні зв’язки між нейронами.

Синапси – це місця, де нейрони передають сигнали один одному ,яка показує у вигляді фаз :

1. Початкова фаза (0–2). Крива майже горизонтальна. Що відбувається:

- мозок тільки починає реагувати на стимул

- нейрони ще слабко пов’язані

- формується початкове збудження синапсів

Приклад: коли людина тільки починає вчити нову навичку. Переважає функціональна пластичність .

2. Фаза швидкого росту (3–7). Крива різко піднімається. Що відбувається:

- активується довготривала потенціація (LTP);

- збільшується кількість рецепторів;

- утворюються нові синапси;

- нейронна мережа перебудовується.

Це основний період навчання. Переважають, синаптична + структурна пластичність

3. Фаза стабілізації (8–10). Крива вирівнюється. Що відбувається:

- нейронні зв’язки стають стабільними

- формується довготривала пам’ять

- навичка автоматизується

Приклад: людина вже добре володіє навичкою мозок витрачає менше енергії на її виконання. Переважає, функціональна стабілізація + частково структурна фіксація

Отже, після проходження всіх фаз (початкової, швидкого росту і стабілізації) мозок формує стійку нейронну мережу, яка ефективно відповідає за нову навичку.

Це дає нам практичне обґрунтування що переважає в цьому процесі функціональна пластичність,та уявлення для вибору покращення функцій рухів , та методів реабілітації.

2.2. Методи реабілітації та їх вплив на нейропластичність мозку

Детально розглянемо сучасні окремі методи реабілітації по нейропластичності; дзеркальна терапія, сенсорна стимуляція, а також методи нейромодуляції. Їх об’єднує спільна мета – активізація нейронних мереж, посилення синаптичної передачі та формування нових функціональних зв’язків, що сприяє відновленню втрачених функцій при компресіїї променевого нерва .

1. Дзеркальна терапія (*mirror therapy*)

Метод реабілітації, при якому використовується дзеркало для створення ілюзії руху або нормальної роботи кінцівки з метою “обману” мозку і

відновлення функцій або зменшення болю використовується як допоміжний засіб при компресійних ураженнях нервів.

Процес спрямований на роботу з нейропластичністю та болем, а не на усунення компресії.

Відносно новітній доступний підхід, який перший раз застосовували при інсульті в 1996 році, вченим Вілайянур С. Рамачандран індійсько-американський невролог, відомий своїми дослідженнями мозку, сприйняття та фантомних відчуттів [21].

Послідовність застосування першого методу дзеркальної терапії вченим:

1. Відбір пацієнтів. Обирав людей, які мали ампутовану кінцівку (паралізовану кінцівку), та могли відчувати фантомний біль або "застиглу" кінцівку.

2.Підготовка дзеркала. Використовувалося звичайне вертикальне дзеркало, яке ставили між руками пацієнта.

3. Позиціонування кінцівок. Здорову руку розміщували перед дзеркалом ампутовану (або паралізовану) – позаду дзеркала, щоб її не було видно рис 2.3.

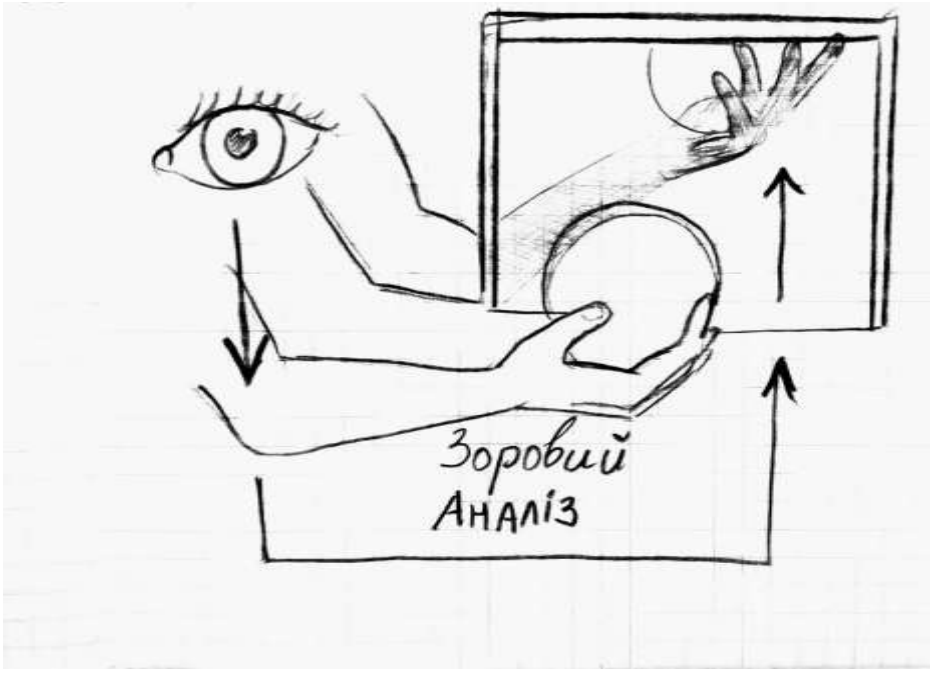


Рис 2.3. Гравюра застосування дзеркала , для аналізу руху

4. Створення візуальної ілюзії. Пацієнт дивився у дзеркало і бачив відображення своєї здорової руки так, ніби у нього було «дві руки».

5. Виконання симетричних рухів. Пацієнт почав рухати здорову руку (наприклад: стискав її в кулак, розправляв пальці), що створювало ілюзію, ніби рухаються обидві кінцівки.

Ефективність якої підтверджується клінічними дослідженнями в медичних центрах Індії.

У рандомізованому перехресному дослідженні взяли участь 64 пацієнти віком від 15 до 75 років, яких було розподілено на експериментальну та контрольну групи. Учасники виконували спеціальні вправи тривалістю 15 хвилин щоденно. Оцінювання ефективності терапії проводили за допомогою візуальної аналогової шкали болю та опитувальника Мак-Гілла на різних етапах спостереження [22].

Результати. Біль помітно зменшився вже через приблизно через 4 тижні.

Ефект зберігається до 12 тижнів, тобто не короткочасний. На ранньому етапі відбувається активація нейронних мереж і зменшення болю (перехід до фази адаптації). При регулярній стимуляції формується стійка нейронна перебудова (фаза плато), що супроводжується перебудовою сенсомоторних зв’язків і зниженням патологічної активності.

2. Медод дзеркальної терапії із застосуванням VR-окулярів

Сучасні дослідження, зокрема вченого Ю-Вей Сє (Тайвань), спрямовані на використання VR-окулярів для дзеркальної терапії у реабілітації після інсульту та компресії нервів.

Поєднав просте застосування дзеркала в більш сучасний варіант дій:

Підготовка системи. На екрані в VR запускали віртуальне середовище з побутовими завданнями: готування, водіння, покупки, хатня робота. У системі були режими unilateral і bilateral (рис 2.4).

В дослідженні перебувало 100 учасників експерименту. Результати були такі (цифри): Icahn School of Medicine at Mount Sinai.



Рис. 2.4.

- SUS (зручність використання): ~56,67/100
- Анкета зворотного зв’язку: ~36,93/50
- VRSQ (неприємні ефекти/нудота): ~6,28/100

Результати. VR-дзеркальна система показала помірну зручність використання (SUS ~56,7), високий зворотний зв’язок і низький рівень неприємних ефектів (VRSQ ~6,3), що свідчить про її клінічну придатність для реабілітації верхньох кінцівки (див. Дод. В), VR-система успішно розроблена і працює в клінічних умовах [24].

Пацієнти можуть використовувати її без значних побічних ефектів, таких як нудота та біль .

Система має потенціал для застосування у реабілітації після компресії та інсульту.

Потрібні подальші дослідження, щоб оцінити ефективність покращення моторної функції (тобто наскільки саме вона допомагає рухам руки) [23].

3. Метод сенсорної стимуляції

Основний прийом в цьому методі стимуляції застосовують сенсорну

реедукацію - це реабілітаційний підхід після травми або ремонту периферичного нерва, спрямований на відновлення сенсорної функції та кортикальної репрезентації.

Огляд наукових досліджень показує нам як сучасно діють при цих станах .

Розглянемо основні роботи. Oud, Beelen, Eijffinger, Nollet (2007) – систематичний огляд

У дослідженні Oud, Beelen, Eijffinger і Nollet (2007) було проведено сисематичний огляд, присвячений оцінці ефективності реабілітаційних втручань у пацієнтів із різними порушеннями рухової функції [19].

Основні види стимуляції:

1. Тактильна стимуляція (дотик).Пацієнт отримував різні стимули на шкіру: ватка (легкий дотик), пензлик, губка, тканини різної грубості, іноді – спеціальні щіточки

Завдання було таке визначити, де доторкнулися описати відчуття

2. Дискримінація дотику (розпізнавання). Один чи два дотики (two-point discrimination),різні місця на пальці, пацієнт мав сказати скільки точок де саме розташовані .

3. Стереогноз (розпізнавання предметів). Очі закриті, пацієнт брав предмети (монета, ключ, ґудзик, кубик).

Завдання: визначити предмет лише на дотикАвтори проаналізували наявні дослідження та дійшли висновку, що фізична терапія може позитивно впливати на відновлення функціональних можливостей, особливо тоді, коли програми є індивідуально підібраними, достатньо інтенсивними та спрямованими на кілька аспектів відновлення одночасно.

Водночас вони наголосили, що переконливість доказів обмежується відмінностями між дослідженнями, різною якістю методології та невеликими вибірками, тому результати слід трактувати обережно.

Попри це, огляд мав важливе значення для розвитку доказової реабілітації, оскільки показав потребу в більш стандартизованих протоколах і

якісніших рандомізованих дослідженнях.

Weili Xia та співавтори (2021) – систематичний огляд. Великий огляд досліджень з 1970 по 2020 рік щодо сенсорної реедукації після реконструкції периферичного нерва.

Основна мета – оцінити вплив на відновлення функції руки після ремонту нерва.

Підкреслює важливість контрольованих досліджень, але загальні дані вказують на позитивний вплив реедукації на функцію руки.

РКД з mirror-терапією (2015). Рандомізоване дослідження ранньої реедукації із застосуванням дзеркальної терапії після ремонту серединного та ліктьового нервів.

Результати: клінічні покращення були, але дзеркальна терапія не була статистично кращою за класичну реедукацію.

Показує, що нейропластичні підходи досі потребують уточнення

Дослідження надають дані про функціональні покращення, зменшення болю, покращення якості життя у пацієнтів з пошкодженням периферичних нервів, які проходили реедукацію.

Єдиним загальним результататом є у всіх роботах (Oud 2007; Xia 2021; РКД з mirror therapy), підкреслюється одна спільна ідея: відновлення чутливості відбувається не лише на рівні нерва, а й через перенавчання мозку (*cortical reorganization*).

4 . Метод нейромодуляції

Нейромодуляція – це сучасна група методів лікування, що полягають у цілеспрямованому впливі (електричному, магнітному або хімічному) на нервову систему для зміни її активності.

Одним із перших українських нейрофізіологів Платон Костюк, який працював і створив основу ідею.

Досліджував іонні механізми роботи нейроні - вивчав, як електричні сигнали проходять через нервові клітини, поетапно:

1.Нейрон отримує сигнал. Відкриваються натрієві канали → Na^+ входить

у клітину.

2. Мембрана “збуджується” (деполяризація).Потім відкриваються калієві канали → K^+ виходить ,клітина повертається до нормального стану , натрій-калієвий насос рис 2.5 [18].

Це і є потенціал дії – основний сигнал нервової системи

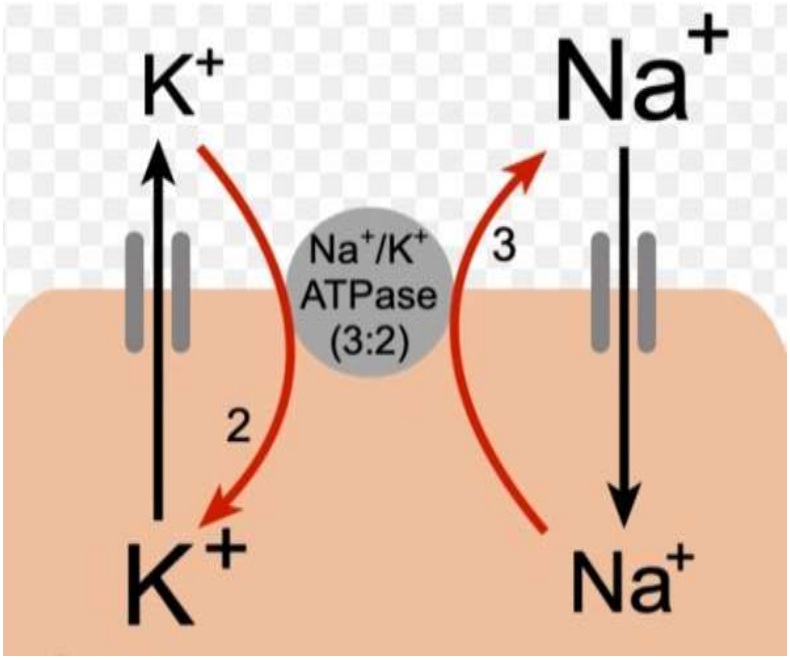


Рис. 2.5 Натрій-калієвий насос

Схема на картинці – це те, що забезпечує «повернення до нормального стану» після вашого другого пункту. Без цього насоса клітина змогла б передати сигнал лише кілька разів, а потім «сіла» б, як розряджений акумулятор.

Другий вчений Майкл Мерзеніч який вивчав і продовжував дослідження нейромодуляції, його праця була схожою с Платоном Костюком.

Майкл Мерзеніч – американський нейронауковець, який одним із перших довів, що мозок здатний змінюватися протягом усього життя. На початковому етапі своєї роботи він досліджував, як організована кора головного мозку, зокрема сенсорні зони [25], що відповідають за дотик і слух. У цих дослідженнях він виявив, що карта мозку не є фіксованою – вона може змінюватися під впливом досвіду.

На наступному етапі він проводив експерименти на тваринах, де вивчав, як змінюється мозок після пошкоджень. Він показав, що після травми інші ділянки мозку можуть брати на себе функції ушкоджених зон. Це стало одним із перших доказів нейропластичності [26].

Далі Мерзеніч почав досліджувати, як можна цілеспрямовано змінювати мозок за допомогою стимуляції. У своїх експериментах він поєднував сенсорні сигнали (наприклад, звуки) з електричною стимуляцією мозку. У результаті нейрони починали сильніше реагувати на ці сигнали, а нейронні зв’язки змінювалися. Це довело, що стимуляція може керувати нейропластичністю[27].

На сучасному етапі він застосував ці знання на практиці, створивши програми тренування мозку.

Ці методи використовуються для відновлення після інсульту, покращення пам’яті та лікування когнітивних порушень. Його роботи показали, що правильна стимуляція мозку може викликати довготривалі зміни в нейронних мережах.

У підсумку Мерзеніч довів, що мозок не є статичною структурою: він постійно перебудовується, а нейромодуляція може цілеспрямовано впливати на цей процес, змінюючи зв’язки між нейронами і відновлюючи функції нервової системи.

2.3. Порівняльний аналіз ефективності методів

Розглянуті методи реабілітації – дзеркальна терапія, VR-дзеркальна терапія, сенсорна стимуляція та нейромодуляція – мають спільну мету: активізацію нейропластичних механізмів центральної нервової системи, відновлення сенсомоторної інтеграції та покращення функціонального стану ураженої кінцівки. Водночас вони істотно відрізняються за механізмом дії, рівнем доказовості, доступністю та практичною ефективністю при компресійних ураженнях променевого нерва .

Для кількісної інтерпретації змін функціональних показників у реабілітаційних дослідженнях використовується стандартна формула відсоткової зміни ефективності 2.3

$$E = \frac{X_{до} - X_{після}}{X_{до}} x100\ \%. \qquad (2.3)$$

Де :Х до – вихідний показник функції до початку терапії

Х після – показник після застосування реабілітаційного впливу

Е – відсоток функціонального покращення.

Використання даної формули дозволяє стандартизувати оцінку на максимум ефективності різних методів реабілітації та забезпечує можливість їх коректного порівняння незалежно від типу клінічних шкал. Основним стандартом є Числова рейтингова шкала (NRS) або Візуально-аналогова шкала (VAS). Це лінійка від 0 до 10, це інструмент для вимірювання інтенсивності болі :

1. Визначемо по формулі ефективность на прикладі дзеркальної терапії :

Розрахунок:

E = (8 − 2) / 8 × 100% = 6/8 × 100% = 75%

2. Сенсорна стимуляція, оцінювалась за умовною шкалою функціональної чутливості (%), де 100% відповідає повністю відновленій чутливості.

Розрахунок:

E = (90 − 30) / (100 − 30) × 100% = 60/70 × 100% ≈ 85,7%

3. Оцінка ефективності нейромодуляції , визначемо ступінь покращення чутливості Показник сенсорної функції оцінювався за функціональною шкалою у відсотках.

Розрахунок:

E = (75 − 50) / 50 × 100% = 25/50 × 100% = 50%

За допомогою таблиці 3.2 та формули, проаналізуємо сучасні методи реабілітації .

Таблиця 2.5

Аналітична таблиця ефективності методів

Метод	**Основний ефект**	**Сильні сторони**	**Недоліки**	**Оптимізація (покращити)**	**Оцінка ефективності в %**
Дзеркальна терапія	Зменшення болю, активація моторної кори, формування нових нейронних зв'язків	Доступність, простота, безпечність E ≈ 65–75%	Не впливає на причину компресії, залежить від регулярності	Крім дзеркала застосувати мобільний додаток та комбінація . E ≈ 65–75%	E ≈ 65–75%
VR-дзеркальна терапія	Покращення моторного контролю, підвищення мотивації, залучення пацієнта	Інтерактивність, функціональні тренування	Висока вартість, недостатня доказова база	Розширити дослідження, зробити доступнішою	E ≈ 70–80%
Сенсорна стимуляція	Відновлення чутливості, кортикаль	Прямий вплив на сенсорну функцію	Повільний ефект, потребує тривалості	Стандартизувати протоколи, підвищити інтенсивність E ≈ 60–70%	E ≈ 60–70%
Нейромодуляція	Сильна активація нейронних мереж,	Потужний вплив, прискорення відновлення	Дорога, складна,обмежена доступність		E ≈ 50%

Пояснення розрахунку (для вставки в роботу) Оцінка ефективності (E) визначалась за узагальненою формулою:

E = (досягнутий клінічний ефект / максимально можливий ефект) × 100%,

де: 100% – умовно максимальне повне відновлення функції;

значення Е базується на аналізі клінічних досліджень, систематичних оглядів та порівнянні результатів (зменшення болю, покращення функції, нейропластичні зміни).

Проведений аналіз сучасних методів реабілітації показав, що всі розглянуті підходи – дзеркальна терапія, VR-дзеркальна терапія, сенсорна стимуляція та нейромодуляція – є доступними і практичними для активації нейропластичності та відновлення функцій при компресійних ураженнях променевого нерва. Їх дія ґрунтується на здатності мозку до перебудови, формування нових нейронних зв’язків і компенсації втрачених функцій.

За результатами аналізу ефективності встановлено, що найбільш доступними та придатними для використання в домашніх умовах є :

Дзеркальна терапія (~70%) – оптимальний базовий метод.

Сенсорна стимуляція (~65%) – критично важлива для відновлення чутливості. дзеркальна терапія та сенсорна стимуляція.

Вони не потребують складного обладнання, можуть виконуватися самостійно після інструктажу спеціаліста та демонструють стабільні результати (у середньому 60–75%). Це робить їх базовими методами реабілітації, особливо на ранніх і середніх етапах відновлення але потребуують вдосконалення та поєднання методів в один цілий комплексний підхід.

РОЗДІЛ 3
ШЛЯХИ ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ СТИМУЛЯЦІЇ НЕЙРОПЛАСТИЧНІСТІ

3.1 Апробація запропонованої моделі нейропластичної реабілітації на основі самоспостереження

У межах апробації запропонованої моделі оцінюється динаміка стану пацієнта із компресією променевого нерва, коли провідними скаргами є помірний біль, оніміння кисті, поколювання та утруднення рухів.

Об’єктом аналізу буде процес відновлення функціонального стану верхньої кінцівки при компресії променевого нервав на відновлення больової чутливості, сенсорної та рухової функції.

Дослідження буде проведено у три етапи на основі аналізу та поєднання сучасних методів нейропластичної реабілітації, що поєднує дзеркальну терапію, сенсорну стимуляцію, контрасту терапію для кисті та контроль результатів через мобільний додаток .

На початковому етапі дзеркальна терапія виконується у класичному варіанті із використанням фізичного дзеркала, але у зв’язку з цим доцільним є поступовий перехід до цифрових технологій, зокрема використання мобільного додатку (Рис 3.1) Digital MT MirrorAR, який є віртуальним аналогом дзеркальної терапії також доступним в домашніх умовах.



Рис.3.1 Цифрова дзеркальна терапія (мобільний додаток)

Мобільний додаток Digital MT MirrorAR використовується як цифровий інструмент для проведення дзеркальної терапії в умовах домашньої реабілітації протягом 1-2 тижнів, у домашніх умовах застосовується дзеркальна терапія по 10-15 хвилин щодня.

З метою практичної реалізації зазначеного підходу процес реабілітації здійснюється поетапно та включає підготовчий етап, налаштування системи, виконання вправ і контроль отриманих результатів:

1. Підготовка до процедури :

- встановити додаток Digital MT MirrorAR на смартфон або планшет;

- зафіксувати пристрій на рівні рук;

- забезпечити хороше освітлення та зручне положення сидячи.

2. Налаштування режиму:

- обрати режим Mirror Therapy;

- вибрати уражену кінцівку (ліва/права рука);

- активувати режим відображення рухів.

3. вибрати уражену кінцівку (права або ліва рука) відповідно до клінічної картини;

4. Виконання вправ:

- виконувати повільні симетричні рухи здоровою рукою;

- спостерігати в екрані “віртуальне відображення” ураженої руки;

- тривалість сеансу: 10-15 хвилин щоденно;

- рекомендовано 1-2 підходи на день.

5.Контроль стану, визначаємо:

- у додатку щоденно фіксується:

- рівень болю ,шкала VAS (0–10),

- ступінь чутливості (%),

- розрахунок за формулою E = (/)x100 %.

функціональні рухи (якість виконання вправ).

На першому етапі проводиться оцінка інтенсивності болю за шкалою, рівень болю, шкала VAS (0–10), ступінь чутливості (%),

Розрахунок ефективності методу проводився для правої верхньої кінцівки, отримані результати наведено в таблиці 3.2.

Записуємо вхідні дані у таблицю для розрахунку та перевірки ефективності 3.2

Таблиця 3.2

Оцінка ефективності реабілітації за показниками болю та чутливості правої руки

Показник	**До реабілітації**	**Після реабілітації**	**Формула розрахунку**	**Ефективність (E, %)**
Біль (VAS, бали)	6	2	$E = (6 - 2) / 6 \times 100\%$	66%
Чутливість (%)	40%	85%	$E = (85 - 40) / (100 - 40) \times 100\%$	75%

Відображення динаміки больового синдрому та чутливості при використанні мобільного додатку Digital MT MirrorAR (власні результати) показано в додатку В .

На другому етапі, з 2-го тижня, додається сенсорна стимуляція: дотик різними текстурами, локалізація дотику, розпізнавання предметів на дотик.

Інтегрована методика (додаток + сенсорика) полягає у поєднанні дзеркальної терапії з використанням мобільного додатку Digital MT MirrorAR та тактильної стимуляції ураженої кінцівки (правої руки). У межах цієї методики пацієнт виконує рухи здоровою рукою, які відображаються у додатку у вигляді дзеркального зображення ураженої кінцівки.

1. Точність локалізації дотику відображає здатність правильно визначати місце тактильного впливу на ураженій кінцівці.

2. Стереогнозія характеризує здатність розпізнавати предмети на дотик без зорового контролю, що свідчить про відновлення складної сенсорної інтеграції.

3. Синхронність рухів відображає ступінь узгодженості між рухами здорової та ураженої кінцівки у дзеркальній терапії, що є показником відновлення моторного контролю та нейропластичної перебудови.

Тепер визначимо показники ефективності кожного етапу, які запишемо в таблиці 3.3

Таблиця 3.3

Показник	**До втручання**	**Після 1-го етапу**	**Після 2-го етапу**	**Загальна зміна**	**Формула загальної ефективності**	**Ефективність**
Біль (VAS)	6	2	1	зниження на 83%	(6 − 1) / 6 × 100%	83%
Чутливість (%)	40	85	88	+48 п.п.	(88 − 40) / (100 − 40) × 100%	80%
Точність локалізації дотику (%)	55	75	90	+35 п.п.	(90 − 55) / (100 − 55) × 100%	77,8%
Стереогнозія (%)	45	70	85	+40 п.п.	(85 − 45) / (100 − 45) × 100%	72,7%
Синхронність	60	75	92	+32 п.п.	(92 − 60) / (100 − 60) × 100%	80%

Отримані дані демонструють ефективність поетапного застосування комплексної нейропластичної методики, що поєднує дзеркальну терапію, сенсорну стимуляцію та функціональні вправи.

На третьому етапі реабілітації 3-4 тиждень основний акцент спрямований на відновлення дрібної моторики кисті, рухів пальців, а також формування навичок захоплення та маніпуляції дрібними предметами й виконання побутових функцій.

Такий підхід відповідає сучасним принципам task-oriented training, який базується на виконанні функціонально значущих завдань і є одним із ключових механізмів індукції досвід-залежної нейропластичності.

У межах цього етапу застосовується контрастна терапія (чергування теплового та холодового впливу), яка сприяє покращенню периферичного кровообігу, зменшенню залишкових трофічних порушень та стимуляції сенсорної аферентації. У поєднанні з цим використовується магнієва підтримка, яка має нейрофізіологічне значення.

Взагалі магній ад’ювантна (допоміжна) терапія, оскільки магній бере участь у регуляції нервово-м’язової передачі, зменшує надмірну збудливість нейронів та сприяє стабілізації мембранного потенціалу [17].

Комбінація контрастної терапії та магнію створює додаткові умови для покращення нервово-м’язової провідності та зменшення м’язового спазму, що опосередковано сприяє більш ефективному виконанню функціональних вправ [17]. У поєднанні з дзеркальною терапією та сенсорною стимуляцією така мультимодальна стратегія забезпечує послідовну активацію моторних, сенсорних і периферичних механізмів відновлення.

Згідно з сучасними дослідженнями, саме комбіновані реабілітаційні програми, які включають функціональні тренування, сенсорне перенавчання та додаткові фізіотерапевтичні впливи, демонструють більш виражений ефект відновлення функції верхньої кінцівки порівняно з монотерапією, що пов’язано з синергетичною активацією нейропластичних процесів у центральній та периферичній нервовій системі .

3.2 Удосконалення нейропластичної реабілітації на основі комбінованого підходу

Удосконалення реабілітації при компресійному ураженні променевого нерва доцільно здійснювати шляхом поетапного поєднання методів нейропластичної стимуляції, які взаємно підсилюють дію один одного.

На основі результатів, отриманих у ході апробації запропонованої моделі, встановлено, що найбільш ефективним є комплексне використання дзеркальної терапії, сенсорної стимуляції, функціональних вправ, контрастної терапії та допоміжної мінеральної підтримки магнієм. Такий підхід забезпечує одночасний вплив на больовий синдром, сенсорну інтеграцію, моторний контроль та периферичну провідність.

Бачимо що на першому етапі реабілітації основний акцент робиться на зменшенні больового синдрому та активації сенсомоторних зон кори

головного мозку за допомогою дзеркальної терапії з використанням мобільного додатку Digital MT MirrorAR. Отримані результати свідчать про суттєве покращення: рівень болю знизився з 6 до 2 балів за шкалою VAS, що відповідає ефективності 66,7%. Це підтверджує, що цифрова дзеркальна терапія є зручним і доступним засобом для домашнього застосування, який дозволяє зменшити больові відчуття та створити умови для подальшого відновлення функції кінцівки.

Другий етап характеризується поєднанням сенсорної стимуляції, спрямованою на відновлення чутливості та сенсорної дискримінації.

У результаті показник чутливості зріс з 40% до 85% після першого етапу, а після другого – до 88%, що в підсумку відповідає 80% ефективності. Також було виявлено покращення точності локалізації дотику: з 55% до 90%, що становить 77,8%. Показник стереогнозії підвищився з 45% до 85% (72,7%), а синхронність рухів – з 60% до 92% (80%). Отримані дані свідчать про те, що поєднання дзеркальної терапії та сенсорної реедукації сприяє формуванню нових сенсомоторних зв’язків і відновленню складних інтегративних функцій нервової системи , як показано на графіку 3.2.

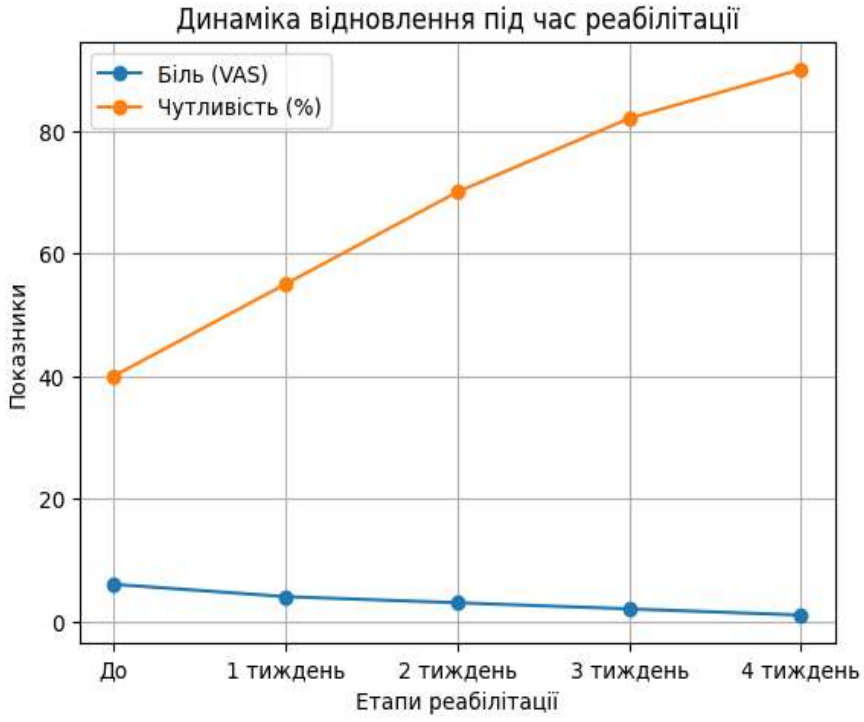


Рис. 3.3 Динаміка відновлення показників під час реабілітації

Графік демонструє позитивну динаміку відновлення пацієнтів у процесі реабілітації. Зокрема, спостерігається поступове зниження рівня болю за візуально-аналоговою шкалою (VAS) від початкових значень до мінімальних на завершальних етапах.

Таким чином, результати апробації підтверджують, що найбільш ефективним є не ізольоване застосування окремого методу, а їх поєднання в єдину поетапну систему. Комбінована реабілітація забезпечує послідовну активацію центральних і периферичних механізмів нейропластичності, сприяє зменшенню болю, покращенню чутливості та відновленню рухової функції правої верхньої кінцівки. Отже, запропонована модель може розглядатися як перспективний напрям удосконалення домашньої нейропластичної реабілітації при компресійних ураженнях променевого нерва

ВИСНОВКИ

У ході дослідження встановлено, що нейропластичність мозку є провідним механізмом відновлення сенсомоторних функцій після уражень периферичних нервів, оскільки саме вона забезпечує перебудову кортикальних карт, посилення синаптичної передачі та формування компенсаторних нейронних зв’язків. При компресійних ушкодженнях, зокрема променевого нерва, зниження аферентного потоку не лише порушує периферичну провідність, а й спричиняє функціональні зміни у центральній нервовій системі, що зумовлює необхідність цілеспрямованої нейрореабілітації.

Результати дослідження узгоджуються із сучасними науковими поглядами на нейропластичність. Зокрема, Вілайянур Рамачандран довів, що дзеркальна терапія активує сенсомоторні зони кори головного мозку та сприяє перебудові нейронних зв’язків, що забезпечує зменшення болю і покращення рухового контролю

Аналіз сучасних підходів показав, що найбільш результативними є методи, які одночасно впливають на сенсорну, рухову та когнітивну складові відновлення. Дзеркальна терапія, сенсорна стимуляція, VR-орієнтовані технології та нейромодуляція активують різні ланки нейропластичних процесів, однак найкращий ефект досягається не при ізольованому застосуванні кожного з них, а за умови поєднання в комплексну поетапну програму. Саме мультимодальний підхід дозволяє зменшити біль, відновити чутливість, покращити точність рухів і підвищити рівень функціональної адаптації ураженої кінцівки.

1. Отримані результати підтверджують високу ефективність запропонованої нейропластичної моделі реабілітації при компресійному ураженні променевого нерва. Уже на першому етапі застосування дзеркальної терапії спостерігалося суттєве зниження інтенсивності болю за шкалою VAS – з 6 до 2 балів, що відповідає 66,7% ефективності. Така динаміка свідчить про

значне зменшення больового синдрому та покращення функціонального стану верхньої кінцівки. Одночасно чутливість кисті підвищилася з 40% до 85%, що підтверджує активізацію сенсорної аферентації та покращення проведення нервових імпульсів.

2. Після другого етапу, який включав поєднання дзеркальної терапії із сенсорною стимуляцією, результати стали ще більш вираженими. Рівень болю знизився до 1 бала, а загальна ефективність склала 83%. Чутливість зросла до 88%, точність локалізації дотику – до 90%, стереогнозія – до 85%, а синхронність рухів – до 92%. Такі показники свідчать про відновлення складних сенсомоторних механізмів, покращення координації рухів та формування нових нейронних зв’язків.

Ці дані свідчать про те, що після ураження периферичного нерва саме мозок стає активним учасником відновлення, а не лише «спостерігачем» периферичного загоєння. Зменшення болю, зростання чутливості, покращення стереогнозії, точності локалізації дотику та синхронності рухів означає, що в центральній нервовій системі відбувається перебудова сенсомоторних карт, посилюється синаптична передача між нейронами та формуються нові функціональні зв’язки. Іншими словами, мозок не просто отримує інформацію від відновленого нерва, а сам активно “переналаштовує” спосіб обробки цієї інформації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. **Драцюк М. В.** Механізм нейропластичності в осіб із черепно-мозковою травмою. *Pain Medicine*. 2018. Т. 3, № 2/1. С. 26–30. DOI: 10.31636/pmjua.t1.27273

2. **Черненко М. Є., Вовк В. І.** Нейропластичність: від Сантьяго Рамон-і-Кахаль до наших днів (огляд літератури). *Український вісник психоневрології*. 2018. Т. 26, вип. 1 (94). С. 116–123.

3. **Черненко М. Є., Вовк В. І.** Нейропластичність у хворих на розсіяний склероз в умовах запального процесу. *Український вісник психоневрології*. 2018. Т. 26, вип. 2 (95). С. 29–32.

4. **Чень І. Б., Боднар О. І., Вакуленко Л. О., Храбра С. З., Стельмах Г. О., Федоров С. М.** Сучасне бачення та практичні аспекти механізму нейропластичності при проведенні реабілітації. *Здобутки клінічної і експериментальної медицини*. 2025. № 3. С. 186–189.

5. **Розова Т.** Нейропластичність мозку: сучасні наукові уявлення, нейробіологічні механізми та практичне значення. *Психологічна наука і практика*. 2025. С. 181–183.

6. **Гайворонський І. В., Черкасов В. Г., Сапін М. Р.** Анатомія людини : підручник : у 3 т. Київ : Нова Книга, 2018. Т. 1. 688 с.

7. **Головацький А. С., Черкасов В. Г., Сапін М. Р.** Анатомія людини : підручник : у 3 т. Вінниця : Нова Книга, 2015. Т. 2. 456 с.

8. **Погорєлов А. В. та ін.** Основні теоретичні, патофізіологічні та практичні аспекти нейропластичності. *Медичні перспективи*. 2017. Т. 22, № 1. С. 4–9.

9. **Дойдж Н.** Пластичність мозку. Приголомшливі факти про те, як думки здатні змінювати структуру та функції нашого мозку / пер. з англ. Київ : Клуб Сімейного Дозвілля, 2011. 512 с. ISBN 978-611-01-2009-8.

10. **Козявкін В. І., Шестопалова Л. Ф., Волошин Б. Д.** Медична реабілітація : підручник. Київ : Медицина, 2019. 400 с.

11. **Крижановський Г. Н., Магльований А. В.** Нормальна фізіологія : підручник. Львів : Світ, 2017. 520 с.

12. **Марута N. О., Волошин П. В.** Неврологія : національний підручник. Київ : Медицина, 2020. 1056 с.

13. **Головацький А. С., Черкасов В. Г., Сапін М. Р.** Анатомія людини : підручник : у 3 т. Вінниця : Нова Книга, 2018. Т. 3. 344 с.

14. **Міхньов В. А., Дубенко О. Є.** Клінічна неврологія. Харків : Право, 2018. 640 с.

15. **Мухін В. М.** Физична реабілітація : підручник. Київ : Олімпійська література, 2016. 488 с.

16. **Черкасов В. Г., Кравчук С. Ю.** Оперативна хірургія та топографічна анатомія. Київ : ВСВ «Медицина», 2018. 376 с.

17. **Шевченко О. А.** Основи нейропластичності та відновлення функцій нервової системи. Київ : Медицина, 2021. 312 с.

18. **Матвієнко Ю. О., Матвієнко Я. В.** Нейропластичність (Огляд проблеми). 2024. 35 с. URL: https://library.dmed.org.ua/uploads/files/2024-12/1735292504_fl105-1.pdf

19. Базальні ганглії, вибір дій та навчання підкріплення. *LibreTexts українською*. 2026. URL: https://ukrayinska.libretexts.org/Медицина/Фармакологія_та_неврологія/Книга_Обчислювальна_когнітивна_неврологія

20. **Костюк П. Г., Зима В. Л., Магура І. С. та ін.** Біофізика : підручник. Київ : ВПЦ «Київський університет», 2008. 567 с.

21. **Чекман І. С.** Магній в медицині. Київ : Здоров’я, 1992. С. 85–120.

22. **Боднар О. І., Храбра С. З., Вакуленко Л. О., Макарчук Н. Р., Стельмах Г. О.** Вплив сенсомоторної терапії на нейропластичні процеси при рухових розладах у дітей раннього віку. *Здобутки клінічної і експериментальної медицини*. 2026. № 4. С. 6–12. DOI: 10.11603/1811-2471.2025.v.i4.15805

23. **Oud T., Beelen A., Eijffinger E., Nollet F.** Sensory re-education after

nerve injury of the upper limb: a systematic review. *Clinical Rehabilitation*. 2007. Vol. 21, No. 6. P. 483–494. DOI: 10.1177/0269215507074395

24. **Duan C., Gan H., Zhuo X., Xiao Y., Chen X.** A review of research progress of mirror therapy in peripheral nerve injury. *Frontiers in Neurology*. 2026. Vol. 17. Art. 1740020. URL: https://www.frontiersin.org/journals/neurology/articles/10.3389/fneur.2026.1740020

25. **Ramachandran V. S., Rogers-Ramachandran D.** Synaesthesia in phantom limbs induced with mirrors. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 1996. Vol. 263, No. 1369. P. 377–386. DOI: 10.1098/rspb.1996.0058

26. **Ramadugu S., Nagabushnam S. C., Katuwal N., Chatterjee K.** Intervention for phantom limb pain: a randomized single crossover study of mirror therapy. *Indian Journal of Psychiatry*. 2017. Vol. 59, No. 4. P. 457–464. DOI: 10.4103/psychiatry.IndianJPsychiatry_259_16

27. **Hsieh Y.-W., Howe T.-H., Lee M.-T., Tai R.-Y., Chen C.-C.** Design and usability evaluation of an immersive virtual reality mirrored hand system for upper limb stroke rehabilitation. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Art. 5781. DOI: 10.1038/s41598-025-90698-x

28. **Yu-Wei Hsieh.** ResearchGate : авторський профіль. 2026. URL: https://www.researchgate.net/profile/Yu-Wei-Hsieh

29. **Merzenich M. M.** Brain plasticity based therapeutics. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2014. Vol. 8. Art. 385. DOI: 10.3389/fnhum.2014.00385

30. **Merzenich M. M., Van Vleet T. M., Nahum M.** Brain plasticity based therapeutics: a review. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2014. Vol. 8. Art. 386.

31. **Merzenich M. M.** Neuroplasticity: Introduction. *Progress in Brain Research*. 2013. Vol. 207. P. 1–6. DOI: 10.1016/B978-0-444-63327-9.00001-7

32. **Kilgard M. P., Merzenich M. M.** Cortical map reorganization enabled by nucleus basalis activity. *Science*. 1998. Vol. 279. P. 1714–1718. DOI: 10.1126/science.279.5357.1714

33. **Merzenich M. M.** Soft-wired: How the new science of brain plasticity

can change your life. San Francisco : Parnassus Publishing, 2013. 300 p.

34. **Чень І. Б., Боднар О. І., Вакуленко Л. О., Храбра С. З., Стельмах Г. О., Федоров С. М.** Сучасне бачення та практичні аспекти механізму нейропластичності при проведенні реабілітації. *Здобутки клінічної і експериментальної медицини*. 2025. № 3. С. 186–189. DOI: 10.11603/1811-2471.2025.v.i3.15570

35. **Mechelli A., Crinion J. T., Noppeney U. et al.** Structural plasticity in the bilingual brain: proficiency in a second language and age at acquisition affect grey-matter density. *Nature*. 2004. Vol. 431. P. 757. DOI: 10.1038/431757a

36. **Davis D. D., Kane S. M.** Ulnar Nerve Entrapment. *StatPearls [Internet]*. Treasure Island (FL) : StatPearls Publishing, 2025. URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32310389/

37. **StatPearls Editorial Board.** Anatomy, Shoulder and Upper Limb, Osborne Band. *StatPearls [Internet]*. Treasure Island (FL) : StatPearls Publishing, 2025. URL: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK557647/

38. **Mahan F., James J., Sutton L. G., Werner F. W.** Morphology of the cubital tunnel: an anatomical and biomechanical study with implications for treatment of ulnar nerve compression. *J Hand Surg Am*. 2011. Vol. 36, No. 10. P. 1988–1995. URL: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5383373/

39. **Osborne G.** Compression neuritis of the ulnar nerve at the elbow. *Hand (N Y)*. 1970. Vol. 2. P. 10–13. URL: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5383373/

40. **Voss P., Thomas M. E., Cisneros-Franco J. M., de Villers-Sidani É.** Dynamic brains and the changing rules of neuroplasticity: implications for learning and recovery. *Frontiers in Psychology*. 2017. Vol. 8. Art. 1657. DOI: 10.3389/fpsyg.2017.01657