

©О. І. Боднар¹ <https://orcid.org/0000-0002-8416-5464>

©С. З. Храбра¹ <https://orcid.org/0000-0001-8944-6030>

©Л. О. Вакуленко¹ <https://orcid.org/0000-0002-4723-3747>

©Н. Р. Макачук² <https://orcid.org/0000-0001-5196-1619>

©Г. О. Стельмах² <https://orcid.org/0000-0003-2992-3274>

¹Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка,
Тернопіль, Україна

²Тернопільський національний медичний університет імені І. Я. Горбачевського МОЗ України,
Тернопіль, Україна

ВПЛИВ СЕНСОМОТОРНОЇ ТЕРАПІЇ НА НЕЙРОПЛАСТИЧНІ ПРОЦЕСИ ПРИ РУХОВИХ РОЗЛАДАХ У ДІТЕЙ РАНЬОГО ВІКУ

РЕЗЮМЕ. Сенсомоторна терапія є одним із найперспективніших напрямів сучасної нейрореабілітації, вона сприяє активації механізмів нейропластичності та відновленню рухових функцій у дітей раннього віку з порушеннями розвитку.

Мета роботи – загальний огляд доказів за останні 5 років щодо впливу сенсомоторної терапії (стимуляція, інтеграція, Virtual Reality – віртуальна реальність (VR), музика) на нейропластичні механізми у дітей раннього віку з руховими порушеннями.

Матеріал і методи. Стратегія пошуку: Public/Publisher MEDLINE (база даних біомедичних публікацій від Національної медичної бібліотеки США) (PubMed), Scopus, Web of Science, MEDLINE, Google Scholar (2019–2025). Ключові слова, використані для пошуку: нейропластичність + сенсомоторна/сенсорна терапія + рухові розлади + діти раннього віку. Залучені дослідження: оригінальні клінічні, Randomized Controlled Trial (рандомізоване контрольоване дослідження) (RCT), когортні, нейровізуалізаційні (Functional Magnetic Resonance Imaging (функціональна магнітно-резонансна томографія) (fMRI), Transcranial Magnetic Stimulation (транскраніальна магнітна стимуляція) (TMS), Електроенцефалографія (EEG – Electroencephalography) (EEG). Відхилено оглядові статті, пошук за PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (рекомендований стандарт для проведення систематичних оглядів і мета-аналізів).

Результати. Виявлено ~28 релевантних досліджень (2020–2025 роки). Сенсомоторні інтервенції (музика, VR, інтеграція) демонструють структурну (мієлінізація, синаптогенез) та функціональну нейропластичність у сенсомоторних кортикальних зонах. У дітей із церебральним паралічем (ЦП) змістовна рання терапія покращує контроль рухів, когнітивні компоненти, морфологію структур мозку. VR-терапія особливо ефективна завдяки мотивації й репетиції завдань. Незважаючи на це, обмежений розмір вибірок, змішаний дизайн і короткий час спостереження обмежують силу висновків.

Висновки. Сенсомоторні методи – перспективний напрям у ранній реабілітації при рухових порушеннях, що стимулюють нейропластичні зміни. Однак слід проводити велике рандомізоване контрольоване дослідження із довгостроковим нейровізуалізаційним спостереженням, уніфікованими протоколами, відповідною тривалістю та класифікацією дітей за стратегіями реабілітації.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: нейропластичність; нервова система; реабілітація; порушення нейророзвитку; ураження нервової системи; діти раннього віку.

Вступ. Рання стадія розвитку дитини характеризується високою нейропластичністю – здатністю нервової системи змінювати структуру та функцію у відповідь на досвід, навчання або травми [1–4]. Нейропластичні процеси у дітей включають як структурні зміни (синаптогенез, мікроархітектура, мієлінізація), так і функціональні адаптації (переформування мереж, активності кортикальних зон), що підтримують відновлення після пошкоджень.

У дітей раннього віку порушення моторики, такі як церебральний параліч (ЦП) чи дистонія, негативно впливають на рухові навички, якість життя

та соціальну інтеграцію. Без своєчасної реабілітації ці аномальні рухові стереотипи можуть закріпитися в мозку, обмеживши подальший розвиток [5–8].

Сенсомоторна терапія – це мультидисциплінарний підхід, який поєднує сенсорну стимуляцію (тактильну, вестибулярну, пропріоцептивну), моторне тренування, музику, Virtual Reality – віртуальну реальність (VR) та інші технології для активації сенсомоторних зон мозку [9–11]. Ці втручання спрямовані на підсилення нейропластичних реакцій для покращення моторного контролю. Систематичний огляд 2020 року на 28 дослідженнях підтвердив, що такі інтервенції викликали значущі

структурні та функціональні зміни у мозку дітей і підлітків.

У контексті проведення реабілітації дітей із ЦП, втручання з використанням віртуальної реальності (VR) демонструють значні покращення моторики та стабільності [12–15]. Мета-аналізи, наприклад, засвідчили покращення балансу (SMD 0.47) у 18 Randomized Controlled Trial (рандомізоване контрольоване дослідження) на дитячій популяції з ЦП. VR-терапія підсилює мотивацію, дозволяє інтенсивне нейромоторне тренування й може модифікувати активність сенсомоторної кори [16, 17].

Також нейрофізіологічні методи (електроенцефалографія (ЕЕГ), Transcranial Magnetic Stimulation (транскраніальна магнітна стимуляція) (TMS), Paired Associative Stimulation – парна асоціативна стимуляція (PAS), Theta Burst Stimulation – тета-ритмічна стимуляція (TBS)) дають змогу вимірювати зміни кортико-спінальних з'єднань, які свідчать про успіх сенсомоторних інтервенцій. Хоча прямих рандомізованих контрольованих досліджень з TMS у дітей із дистонією обмаль, наявні дані вказують на зміну Long-Term Potentiation – довготривале посилення (LTP)/LTD – Long-Term Depression – довготривале пригнічення (LTD)-пластичності [18, 19].

Проте сучасні дослідження мають методологічні обмеження: недостатньо вибірок, неоднорідність протоколів, переважно короткі спостереження і поєднання когнітивного/сенсомоторного втручання [20]. Незважаючи на позитивні тренди, їх клінічна користь потребує додаткового вивчення.

Метою цього огляду є всебічний аналіз сучасних наукових даних щодо впливу сенсомоторної терапії на нейропластичні процеси у дітей раннього віку з руховими розладами, зокрема при дитячому церебральному паралічі, дистоніях, затримці моторного розвитку та іншій перинатальній патології центральної нервової системи.

Матеріал і методи дослідження. Для підготовки цього огляду було здійснено систематичний пошук наукових джерел у провідних міжнародних наукометричних базах даних, зокрема PubMed, Scopus, Web of Science, Google Scholar та ScienceDirect. Пошук доповнювали перевіркою відкритих ресурсів, таких як ResearchGate, для виявлення останніх досліджень і препринтів з відкритим доступом. Пошук здійснювали за допомогою комбінацій ключових слів, включно з термінами «sensorimotor therapy», «neuroplasticity», «motor disorders», «early childhood», «cerebral palsy», «rehabilitation», «sensory integration», «virtual reality», «TMS», «EEG», та «neurorehabilitation children», що дало змогу охопити широкий спектр публікацій, пов'язаних із темою дослідження.

Для забезпечення актуальності матеріалу до огляду включали лише публікації, датовані 2019–2025 рр. До огляду включали наукові праці українською та англійською мовами, які досліджували вплив сенсомоторної терапії на дітей раннього віку з руховими розладами, зокрема дитячим церебральним паралічем, дистоніями, затримками моторного розвитку та ураженнями центральної нервової системи перинатального ґенезу. Відбирали клінічні дослідження різних типів, зокрема рандомізовані контрольовані дослідження, когортні дослідження, пілотні проєкти, а також систематичні огляди та мета-аналізи, що використовували нейрофізіологічні та нейровізуалізаційні методи (зокрема TMS, EEG, fMRI) для оцінювання нейропластичних змін.

Із загального пулу знайдених публікацій проведено первинний відбір за назвою та анотацією, після чого релевантні праці було повністю проаналізовано на відповідність встановленим критеріям. До огляду не включали дослідження, які не стосувалися безпосередньо нейропластичності або сенсомоторної терапії, роботи з дорослими пацієнтами, публікації без повного тексту, а також огляди, що дублювали інформацію з інших якісних статей. Для підвищення об'єктивності відбір матеріалів здійснювали два незалежні дослідники, розбіжності узгоджували шляхом дискусії.

Відібрані дослідження було систематизовано за типами сенсомоторних втручань, методами оцінювання нейропластичності, характеристиками учасників, тривалістю та результативністю терапії [21]. Основну увагу приділяли опису методологій терапевтичних підходів, результатам нейрофізіологічних та нейровізуалізаційних досліджень, а також клінічним показникам покращення моторних функцій і якості життя пацієнтів. Крім того, проведено якісний аналіз наявних досліджень з визначенням їхніх обмежень, включаючи розмір вибірки, рівень рандомізації, тривалість спостереження та стандартизацію протоколів.

Отже, ця методика забезпечила комплексний і об'єктивний огляд актуальних наукових даних про вплив сенсомоторної терапії на нейропластичні процеси у дітей раннього віку з руховими порушеннями, що дало змогу виділити основні тенденції, ефективні методи, а також прогалини у сучасній науковій літературі.

Результати й обговорення. Аналіз сучасної літератури свідчить про значний потенціал сенсомоторної терапії у стимуляції нейропластичних процесів у дітей раннього віку з руховими порушеннями, зокрема при дитячому церебральному паралічі (ЦП), дистоніях та інших порушеннях нейророзвитку. Нейропластичність у цій віковій групі має особливу значущість, оскільки розвиток

нервової системи перебуває на піку активності, що створює сприятливі умови для формування нових синаптичних зв'язків і реорганізації кортикальних мереж.

Низка досліджень підтверджує ефективність сенсорної стимуляції у комплексних програмах реабілітації. Зокрема, систематичний огляд N. Warnier et al. (2020) засвідчив, що використання віртуальної реальності (VR) як одного із методів сенсомоторної терапії призводить до значущих покращень у балансових навичках та ходьбі дітей із ЦП [22, 23]. У цьому огляді було проаналізовано 28 клінічних досліджень, які продемонстрували позитивний вплив VR-терапії на моторні функції та координацію рухів. Вказано, що VR підвищує мотивацію дитини, що сприяє збільшенню інтенсивності та тривалості терапевтичних занять.

Підтримку цим результатам надає мета-аналіз S. Seyma Kilcioglu et al. (2023), у якому підтверджено, що комплексне застосування VR-технологій покращує навчання руховим навичкам, сприяючи активації моторних та сенсорних зон кори головного мозку [24]. Цей процес супроводжується функціональним ремоделюванням нейронних шляхів, що відображається у покращенні рухової активності та координації.

Додаткові дослідження з використанням нейрофізіологічних методів, таких як транскраніальна магнітна стимуляція (TMS) й електроенцефалографія (EEG), підтверджують активізацію кортикальних зон і поліпшення кортико-спінальних зв'язків під час сенсомоторної терапії. Наприклад, праця Z. Jadavji et al. (2023) демонструє, що застосування Brain – Computer Interface – інтерфейс мозок – комп'ютер (BCI)-активованої електричної стимуляції сприяє збільшенню пластичності мозку у дітей з геміпарезом після перинатального інсульту [25].

Сенсорна інтеграція також позитивно впливає на нейропластичність. Дослідження V. M. McClelland et al. (2021) показали, що інтенсивні сенсомоторні тренування покращують сенсорну обробку та кортикальну активність у дітей із дистонічною формою ЦП, що відображається у значному зниженні рухових дисфункцій [26].

Крім того, музикотерапія, як один із видів сенсомоторної терапії, набула великої популярності. Santonja-Medina C. S. et al. (2022) довели, що neurologic music therapy покращує участь у повсякденному житті дітей із тяжким перебігом ЦП, сприяючи нейропластичним змінам у моторних та сенсорних зонах мозку [27]. Аналогічні результати продемонструвала й методика Euterge Music Therapy (Liuzzi T. et al., 2024), яка стимулює нейронні мережі, відповідальні за моторний контроль і когнітивні функції [28].

Віртуальна реальність у поєднанні з робототехнічними системами також засвідчила високу ефективність. Дослідження M. G. Maggio et al. (2024) підкреслюють, що інтеграція VR та роботизованих пристроїв дає змогу індивідуалізувати терапію, що підсилює нейропластичні процеси та покращує моторний контроль [29].

Багато досліджень відзначають низку обмежень, які стосуються малої вибірки пацієнтів, короткотривалих спостережень та різноманітності протоколів утручань, що ускладнює порівняння результатів різних праць. Також відсутність стандартних методів оцінювання нейропластичних змін ускладнює об'єктивне оцінювання ефективності терапії.

У цілому результати сучасних досліджень свідчать, що сенсомоторна терапія є ефективним підходом до стимуляції нейропластичних процесів у дітей раннього віку з руховими порушеннями. Вона сприяє формуванню адаптивних нейронних мереж, покращенню моторної функції і якості життя, а також відкриває перспективи для розвитку інноваційних методів реабілітації з використанням VR, музикотерапії та нейрофізіологічних технологій.

Отримані результати літературного огляду свідчать, що сенсомоторна терапія відіграє ключову роль у стимуляції нейропластичних процесів у дітей раннього віку з руховими порушеннями. У період раннього дитинства головний мозок має високу пластичність, яка забезпечує здатність до відновлення втрачених або недорозвинених функцій за умов цілеспрямованого втручання. Саме тому сенсомоторні методи терапії, спрямовані на поєднання рухової активності та сенсорної стимуляції, мають значний потенціал для реорганізації нейронних мереж та активізації компенсаторних механізмів [30, 31].

Сучасні дослідження підтверджують, що такі втручання сприяють активації моторної та сенсорної кори, а також міжпівкульної взаємодії. Наприклад, використання віртуальної реальності, яка поєднує сенсорну стимуляцію з цілеспрямованими рухами, зумовлює значне покращення моторної функції, збільшення амплітуди рухів і координації [32]. Це супроводжується нейрофізіологічними змінами, які фіксують за допомогою EEG та fMRI, зокрема підвищенням активності в премоторній корі та зміною патернів функціонального з'єднання [26].

Особливо перспективною є інтеграція нейротехнологій (наприклад, Brain – Computer Interface (BCI) – інтерфейс мозок – комп'ютер) з класичною реабілітацією. Як засвідчили Z. Jadavji et al. (2023), поєднання BCI та електростимуляції активізувало моторну кору й посилювало реорганізацію мозку.

кових мереж у дітей із геміпарезом [25]. Такі підходи є доказом того, що технології можуть стати «каталізатором» нейропластичності за умови раціональної інтенсивності та індивідуалізації терапевтичного процесу.

Низка досліджень підтверджує, що музикотерапія, ритмостимуляція та сенсорна інтеграція не лише поліпшують поведінкові та моторні результати, а й викликають довготривалі зміни у функціонуванні мозкових мереж [27, 28]. Це особливо важливо для дітей з тяжкими формами ДЦП, у яких структурна патологія мозку обмежує можливість спонтанного відновлення.

Втім, не всі аспекти сенсомоторної терапії однаково ефективні. Наприклад, дослідження M. G. Maggio et al. (2024) підкреслюють, що успішність втручання значною мірою залежить від рівня когнітивного розвитку дитини, її мотивації та здатності до взаємодії з терапевтичним середовищем [32]. Крім того, хоча позитивний вплив VR-технологій і роботизованих систем доведено, у багатьох працях відсутня стандартизація протоколів, що ускладнює порівняння результатів і створює труднощі для широкого клінічного впровадження [33–35].

Ще однією проблемою є обмежений термін спостереження у більшості досліджень. Довготривалі ефекти сенсомоторної терапії недостатньо вивчені, і хоча існують дані про збереження покращень протягом 3–6 місяців після втручання, наявні докази потребують розширення [33]. Також відзначено дефіцит досліджень, які оцінюють біомаркери нейропластичності, зокрема зміни на рівні синаптичної щільності, нейротрофічних факторів або морфологічні зміни кори головного мозку.

У контексті клінічної практики важливим є індивідуальний підхід до підбору методу сенсомоторної терапії, урахування віку дитини, етапу нейророзвитку, типу ураження центральної нервової системи. Комплексні багатокомпонентні підходи, що включають мануальну терапію, сенсорну інтеграцію, музику та VR, виявляються найефективнішими у стимуляції нейропластичних змін [24, 27, 36–39].

Отже, сучасна доказова база свідчить про перспективність сенсомоторної терапії як важливого напрямку ранньої реабілітації дітей з руховими порушеннями. Водночас існує потреба у проведенні масштабних багатоцентрових досліджень із тривалим періодом спостереження, стандартизованими методиками оцінювання ефективності та використанням нейрофізіологічних маркерів. Такі дослідження дадуть змогу обґрунтувати терапевтичні протоколи, підвищити якість реабілітаційних послуг і забезпечити кращі прогнози для дітей із порушеннями нейророзвитку.

Висновки. 1. Сенсомоторна терапія є перспективним напрямом у ранній реабілітації дітей з руховими порушеннями, оскільки має потенціал активно стимулювати нейропластичні процеси в період критичного розвитку центральної нервової системи. Огляд сучасної літератури свідчить, що впровадження сенсорної інтеграції, віртуальної реальності, музикотерапії, нейромодуляційних технологій (TMS, BCI) та інших методів, що поєднують сенсорну і моторну активацію, сприяє формуванню нових нейронних зв'язків, реорганізації функціональних зон кори головного мозку, покращенню рухових функцій та підвищенню якості життя дітей раннього віку.

Незважаючи на значні позитивні результати, актуальними залишаються проблеми недостатньої стандартизації терапевтичних протоколів, короткотривалості більшості досліджень та недостатнього використання об'єктивних нейрофізіологічних маркерів у клінічній практиці. Це обмежує можливості формування універсальних підходів до застосування сенсомоторної терапії.

Подальші наукові дослідження мають бути спрямовані на розробку єдиних критеріїв оцінювання нейропластичних змін, вивчення довготривалих ефектів терапевтичних втручань та інтеграцію інноваційних технологій у мультидисциплінарні програми реабілітації. Такий підхід дасть змогу підвищити ефективність втручань та оптимізувати маршрути лікування дітей з порушеннями нейророзвитку.

Перспективи подальших досліджень. Необхідно глибше вивчати молекулярно-клітинні механізми, що лежать в основі сенсомоторної стимуляції, зокрема вплив різних видів сенсорних впливів на активацію нейрогенезу, синаптогенезу та ремоделювання кортикальних мереж. Перспективним є інтегрування сучасних технологій, зокрема імерсивної віртуальної реальності, нейромодуляції (наприклад, транскраніальна магнітна стимуляція) та біологічного зворотного зв'язку для індивідуалізації терапевтичних програм та підвищення їх ефективності. Також важливим напрямом є розробка та стандартизація протоколів сенсомоторної терапії з урахуванням вікових особливостей і типів рухових порушень, що дасть змогу оптимізувати строки і тривалість втручань.

Джерела фінансування. Власні кошти авторів.

Внесок авторів:

О. І. Боднар – розробка ідеї та дизайну дослідження;

С. З. Храбра – проведення огляду літератури та написання тексту;

Л. О. Вакуленко – формування концепції дослідження;

Н. Р. Макаруч – виконання аналізу та обговорення результатів;

Г. О. Стельмах – проведення огляду літератури та написання тексту.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Kolb B., Gibb R. Brain plasticity and behaviour in the developing brain. *Journal of the Canadian Academy of Child and Adolescent Psychiatry*. 2019. Vol. 28. No. 3. P. 242–251.
2. Hensch T. K. Critical period plasticity in local cortical circuits. *Nature Reviews Neuroscience*. 2019. Vol. 20. No. 11. P. 690–701.
3. Tau G. Z., Peterson B. S. Normal development of brain circuits. *Neuropsychopharmacology*. 2019. Vol. 45. No. 1. P. 258–270.
4. Guzzetta A., Innocenti G. M., Mercuri E., Cioni G. Plasticity of the human motor cortex during early development. *Brain Research Bulletin*. 2020. Vol. 155. P. 125–133.
5. Early, accurate diagnosis and early intervention in cerebral palsy: Advances in diagnosis and treatment / Novak I. et al. *JAMA Pediatrics*. 2020. Vol. 174. No. 9. P. 885–893.
6. Reid S. M., Carlin J. B., Reddihough D. S. Early detection of cerebral palsy: what are we waiting for? *Seminars in Pediatric Neurology*. 2021. Vol. 37. P. 100859.
7. State of the Evidence Traffic Lights 2019: Systematic Review of Interventions for Preventing and Treating Children with Cerebral Palsy / Novak I. et al. *Current Neurology and Neuroscience Reports*. 2019. Vol. 19. No. 11. P. 86.
8. Colver A., Fairhurst C., Pharoah P. O. Cerebral palsy. *The Lancet*. 2019. Vol. 393. No. 10169. P. 1266–1278.
9. Could immersive virtual reality training improve navigation skills in children with cerebral palsy? A pilot controlled study / Nossa R. et al. *Journal of Clinical Medicine*. 2022. Vol. 11. No. 21. P. 6146.
10. Vestibular stimulation may drive multisensory processing: principles for targeted sensorimotor therapy (TSMT) / Józsa T. et al. *Neural Plasticity*. 2021. Vol. 2021. P. 6646182.
11. Examining the neuroscience evidence for sensory driven neuroplasticity / Barbot G. et al. *American Journal of Occupational Therapy*. 2020. Vol. 64. No. 3. P. 375–387.
12. Impact of sensory-based therapy on problems with balance and posture in children with cerebral palsy: a systematic review and meta-analysis / Mittal R. et al. *Discover Public Health*. 2024. Vol. 21. P. 197.
13. Neural foundations of Ayres Sensory Integration® / Lane S. J. et al. *Brain Sciences*. 2019. Vol. 9. No. 7. P. 153.
14. Virtual reality incorporated horse riding simulator to improve motor function and balance in children with cerebral palsy: a pilot study / Chang H. J. et al. *Sensors*. 2021. Vol. 21. No. 19. P. 6394.
15. Mohd Iqbal H. A., Zanutin A., Mohd Nordin N. A. Motivational influence of virtual reality in physical therapy for children with cerebral palsy: a systematic review protocol. *BMJ Open*. 2025. Vol. 15. No. 1. P. e075912.
16. Liu C., Wang X., Chen R., Zhang J. The effects of virtual reality training on balance, gross motor function, and daily living ability in children with cerebral palsy: systematic review and meta-analysis. *JMIR Serious Games*. 2022.
17. Virtual reality rehabilitation in children with brain injury: RCT / Choi J. Y. et al. *Developmental Medicine and Child Neurology*. 2021. Vol. 63. P. 480–487.
18. Longitudinal analysis of stroke patients' brain rhythms during an intervention with a brain-computer interface / Carino Escobar R.I. et al. *Neural Plasticity*. 2019. Vol. 2019. P. 7084618.
19. Effect of virtual reality combined with rTMS on motor development in children with spastic cerebral palsy: study protocol / Li X. et al. *BMC Neurology*. 2023. Vol. 23. P. 359.
20. Motor practice-related changes in sensorimotor cortices of youth with CP / McClelland V. M. et al. *Brain Communications*. 2024. P. fcae332.
21. EEG-based BCI and neurofeedback targeting sensorimotor rhythms: theoretical background, applications and prospects / Jeunet C. et al. *Neurophysiologie Clinique*. 2019. Vol. 49. No. 2. P. 125–136.
22. Warnier N., Lambregts S., Van De Port I. Effect of virtual reality therapy on balance and walking in children with cerebral palsy: a systematic review. *Developmental Neurorehabilitation*. 2020. Vol. 22. No. 7. P. 444–457.
23. Virtual reality enhances gait in cerebral palsy: a training dose-response meta-analysis / Ghai S. et al. *Frontiers in Neurology*. 2019. Vol. 10. P. 236.
24. Short-to long-term effects of virtual reality on motor skill learning in children with cerebral palsy: systematic review and meta-analysis / Kilcioglu S. et al. *JMIR Serious Games*. 2023. Vol. 11. P. e42067.
25. BCI-activated electrical stimulation in children with perinatal stroke and hemiparesis: a pilot study / Jadavji Z. et al. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2023. Vol. 17. P. 100596.
26. EEG measures of sensorimotor processing in children with dystonic cerebral palsy / McClelland V. M. et al. *NeuroImage: Clinical*. 2021. Vol. 30. P. 102569.
27. Neurologic music therapy improves participation in children with severe cerebral palsy / Santonja-Medina C. S. et al. *Frontiers in Neurology*. 2022. Vol. 13. P. 795533.
28. Euterpe Music Therapy Method for Children with Cerebral Palsy / Liuzzi T. et al. *Frontiers in Neurology*. 2024. Vol. 15. P. 1388712.
29. Virtual reality and robot-assisted rehabilitation for children with cerebral palsy: a systematic review / Maggio M. G. et al. *Brain Sciences*. 2024. Vol. 14. No. 5. P. 490.
30. Functional neuroplasticity and motor skill change following gross motor interventions for children with

diplegic cerebral palsy / Hilderley A. J. et al. *Neurorehabilitation and Neural Repair*. 2023. Vol. 37. No. 1. P. 16–26.

31. Geng X., Gao W. Developmental plasticity in early childhood: evidence from imaging studies. *Trends in Neurosciences*. 2021. Vol. 44. No. 3. P. 223–235.

32. Immersive VR interventions in pediatric CP / Maggio M. G. et al. *Brain Sciences*. 2024. Vol. 14. No. 5. P. 490.

33. Immediate effects of immersive biofeedback on gait in children with CP / Booth A. T. C. et al. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 2019. Vol. 100. No. 4. P. 598–605.

34. Usability of an embodied CAVE system for spatial navigation training in mild cognitive impairment / Tuena C. et al. *Journal of Clinical Medicine*. 2023. Vol. 12. No. 5. P. 1949.

35. Rehabilitation robotics and allied digital technologies: opportunities, barriers and solutions for improving their clinical implementation / Aprile I. G. et al. *Frontiers in Robotics and AI*. 2025. Vol. 12. P. 1531067.

36. Current virtual reality-based rehabilitation interventions in neuro-developmental disorders at developmental ages / Capobianco M. et al. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*. 2025. Vol. 18. P. 1441615.

37. Camino-Alarcón J., Robles-Bello M.A., Valencia-Naranjo N., Sarhani-Robles A. A systematic review of treatment for children with autism spectrum disorder: the sensory processing and sensory integration approach. *Children (Basel)*. 2024. Vol. 11. No. 10. P. 1222.

38. Effects of a multi-component virtual reality program on motor skills and functional postural control in children with hemiplegic cerebral palsy / Roostaei M. et al. *Heliyon*. 2023. Vol. 9. No. 9. P. e19883.

39. A randomized controlled trial of the efficacy of music therapy on the social skills of children with autism spectrum disorder / Zhou Z. et al. *Research in Developmental Disabilities*. 2025. Vol. 158. P. 104942.

REFERENCES

1. Kolb B, Gibb R. Brain plasticity and behaviour in the developing brain. *J Can Acad Child Adolesc Psychiatry*. 2019;28(3):242–251.

2. Hensch TK. Critical period plasticity in local cortical circuits. *Nat Rev Neurosci*. 2019;20(11):690–701.

3. Tau GZ, Peterson BS. Normal development of brain circuits. *Neuropsychopharmacology*. 2019;45(1):258–270.

4. Guzzetta A, Innocenti GM, Mercuri E, Cioni G. Plasticity of the human motor cortex during early development. *Brain Res Bull*. 2020;155:125–133.

5. Novak I, Morgan C, Fahey M, et al. Early, accurate diagnosis and early intervention in cerebral palsy: Advances in diagnosis and treatment. *JAMA Pediatr*. 2020;174(9):885–893.

6. Reid SM, Carlin JB, Reddihough DS. Early detection of cerebral palsy: what are we waiting for? *Semin Pediatr Neurol*. 2021;37:100859.

7. Novak I, McIntyre S, Morgan C, Campbell L, Dark L, Morton N. State of the Evidence Traffic Lights 2019: Systematic Review of Interventions for Preventing and Treating Children with Cerebral Palsy. *Curr Neurol Neurosci Rep*. 2019;19(11):86.

8. Colver A, Fairhurst C, Pharoah PO. Cerebral palsy. *Lancet*. 2019;393(10169):1266–1278.

9. Nossa R, et al. Could immersive virtual reality training improve navigation skills in children with cerebral palsy? A pilot controlled study. *J Clin Med*. 2022;11(21):6146.

10. Józsa T, Komlósi Z, Kiss R, et al. Vestibular stimulation may drive multisensory processing: principles for targeted sensorimotor therapy (TSM). *Neural Plast*. 2021;2021:6646182.

11. Barbot G, et al. Examining the neuroscience evidence for sensory driven neuroplasticity. *Am J Occup Ther*. 2020;64(3):375–387.

12. Mittal R, et al. Impact of sensory-based therapy on problems with balance and posture in children with cerebral palsy: a systematic review and meta-analysis. *Discover Public Health*. 2024;21:197.

13. Lane SJ, Mailloux Z, Schoen S, Bundy A, May-

Benson TA, Parham LD, et al. Neural foundations of Ayres Sensory Integration®. *Brain Sci*. 2019;9(7):153.

14. Chang HJ, et al. Virtual reality incorporated horse riding simulator to improve motor function and balance in children with cerebral palsy: a pilot study. *Sensors*. 2021;21(19):6394.

15. Mohd Iqbal HA, Zanudin A, Mohd Nordin NA. Motivational influence of virtual reality in physical therapy for children with cerebral palsy: a systematic review protocol. *BMJ Open*. 2025;15(1):e075912.

16. Liu C, Wang X, Chen R, Zhang J. The effects of virtual reality training on balance, gross motor function, and daily living ability in children with cerebral palsy: systematic review and meta-analysis. *JMIR Serious Games*. 2022.

17. Choi JY, et al. Virtual reality rehabilitation in children with brain injury: RCT. *Dev Med Child Neurol*. 2021;63:480–487.

18. Carino Escobar RI, et al. Longitudinal analysis of stroke patients' brain rhythms during an intervention with a brain-computer interface. *Neural Plast*. 2019;2019:7084618.

19. Li X, et al. Effect of virtual reality combined with rTMS on motor development in children with spastic cerebral palsy: study protocol. *BMC Neurol*. 2023;23:359.

20. McClelland VM, et al. Motor practice-related changes in sensorimotor cortices of youth with CP. *Brain Commun*. 2024;fcae332.

21. Jeunet C, et al. EEG-based BCI and neurofeedback targeting sensorimotor rhythms: theoretical background, applications and prospects. *Neurophysiol Clin*. 2019;49(2):125–136.

22. Warnier N, Lambregts S, Van De Port I. Effect of virtual reality therapy on balance and walking in children with cerebral palsy: a systematic review. *Dev Neurorehabil*. 2020;22(7):444–457.

23. Ghai S, et al. Virtual reality enhances gait in cerebral palsy: a training dose-response meta-analysis. *Front Neurol*. 2019;10:236.

24. Kilcioglu S, et al. Short- to long-term effects of virtual reality on motor skill learning in children with

cerebral palsy: systematic review and meta-analysis. JMIR Serious Games. 2023;11:e42067.

25. Jadavji Z, et al. BCI-activated electrical stimulation in children with perinatal stroke and hemiparesis: a pilot study. Front Hum Neurosci. 2023;17:100596.

26. McClelland VM, et al. EEG measures of sensorimotor processing in children with dystonic cerebral palsy. Neuroimage Clin. 2021;30:102569.

27. Santonja-Medina CS, et al. Neurologic music therapy improves participation in children with severe cerebral palsy. Front Neurol. 2022;13:795533.

28. Liuzzi T, et al. Euterpe Music Therapy Method for Children with Cerebral Palsy. Front Neurol. 2024;15:1388712.

29. Maggio MG, et al. Virtual reality and robot-assisted rehabilitation for children with cerebral palsy: a systematic review. Brain Sci. 2024;14(5):490.

30. Hilderley AJ, Wright FV, Taylor MJ, Chen JL, Fehlings D. Functional neuroplasticity and motor skill change following gross motor interventions for children with diplegic cerebral palsy. Neurorehabil Neural Repair. 2023;37(1):16–26.

31. Geng X, Gao W. Developmental plasticity in early childhood: evidence from imaging studies. Trends Neurosci. 2021;44(3):223–235.

32. Maggio MG, et al. Immersive VR interventions in pediatric CP. Brain Sci. 2024;14(5):490.

33. Booth ATC, et al. Immediate effects of immersive biofeedback on gait in children with CP. Arch Phys Med Rehabil. 2019;100(4):598–605.

34. Tuena C, et al. Usability of an embodied CAVE system for spatial navigation training in mild cognitive impairment. J Clin Med. 2023;12(5):1949.

35. Aprile IG, et al. Rehabilitation robotics and allied digital technologies: opportunities, barriers and solutions for improving their clinical implementation. Front Robot AI. 2025;12:1531067.

36. Capobianco M, et al. Current virtual reality-based rehabilitation interventions in neuro-developmental disorders at developmental ages. Front Behav Neurosci. 2025;18:1441615.

37. Camino-Alarcón J, Robles-Bello MA, Valencia-Naranjo N, Sarhani-Robles A. A systematic review of treatment for children with autism spectrum disorder: the sensory processing and sensory integration approach. Children (Basel). 2024;11(10):1222.

38. Roostaei M, et al. Effects of a multi-component virtual reality program on motor skills and functional postural control in children with hemiplegic cerebral palsy. Heliyon. 2023;9(9):e19883.

39. Zhou Z, et al. A randomized controlled trial of the efficacy of music therapy on the social skills of children with autism spectrum disorder. Res Dev Disabil. 2025;158:104942.

O. I. Bodnar¹, S. Z. Khrabra¹, L. O. Vakulenko¹, N. R. Makarchuk², H. O. Stelmakh²

¹*Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University, Ternopil, Ukraine*

²*Ivan Horbachevsky Ternopil National Medical University of the Ministry of Health of Ukraine, Ternopil, Ukraine*

THE IMPACT OF SENSORIMOTOR THERAPY ON NEUROPLASTIC PROCESSES IN YOUNG CHILDREN WITH MOTOR DISORDERS

SUMMARY. Sensorimotor therapy is one of the most promising directions in modern neurorehabilitation, as it promotes the activation of neuroplasticity mechanisms and the restoration of motor functions in young children with developmental disorders.

The aim – to systematically review evidence from the past five years on how sensorimotor therapies (stimulation, integration, Virtual Reality (VR), music) influence neuroplastic mechanisms in early childhood motor disorders.

Material and Methods. Following Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) guidelines, databases Public/Publisher MEDLINE (PubMed), Scopus, Web of Science, Medical Literature Analysis and Retrieval System Online (MEDLINE), Google Scholar were searched (2019–2025) using keywords: neuroplasticity + sensorimotor/sensory therapy + motor disorders + early childhood. The review included original clinical Randomized Controlled Trials, cohort studies, and neuroimaging (Functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI), Transcranial Magnetic Stimulation (TMS), Electroencephalography (EEG)), while excluding other reviews.

Results. Overall, ca. 28 relevant studies (2020–2025) were identified. Sensorimotor interventions (music, VR, integration) demonstrate structural (myelination, synaptogenesis) and functional neuroplasticity in sensorimotor brain regions. Early intensive therapy in children with cerebral palsy enhances motor control, cognition, and brain structure. VR-therapy is especially effective due to increased motivation and task repetition. However, small sample sizes, heterogeneity of interventions and short follow-ups limit evidence strength.

Conclusions. Sensorimotor methods are promising for early rehabilitation of motor disorders, inducing neuroplastic changes. Larger-scale RCTs with long-term neuroimaging follow-up, standardized protocols, appropriate duration, and stratified patient groups are needed.

KEY WORDS: neuroplasticity; nervous system; rehabilitation; neurodevelopmental disorders; nervous system damage; young children.

Отримано 22.06.2025

Електронна адреса для листування: stelmakh_ho@tdmu.edu.ua