

БЕСПАЛОВА Оксана

Сумський державний педагогічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-0081-6021>

i-ozon777@i.ua

УШКО Яна

Вищий навчальний заклад «Академія рекреаційних технологій і права»

<https://orcid.org/0000-0003-3017-7766>

email: ianaushko21@gmail.com

САВЧУК Ігор

Вищий навчальний заклад «Академія рекреаційних технологій і права»

<https://orcid.org/0000-0002-5724-0078>

email: savthuk.viva@gmail.com

АУДИОМОТОРНА ІНТЕГРАЦІЯ ТА КОРТИКАЛЬНА ПЛАСТИЧНІСТЬ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ RAS У ПОСТІНСУЛЬТНИХ ПАЦІЄНТІВ

Порушення ходи після інсульту залишаються провідною причиною функціональної інвалідизації та зниження якості життя. Сучасні підходи нейрореабілітації орієнтовані на втручання, здатні впливати на сенсомоторну інтеграцію та кортикальну пластичність. Метою дослідження став системний аналіз сучасних наукових даних щодо ефективності ритмічної слухової стимуляції (Rhythmic Auditory Stimulation, RAS) у відновленні функціональної ходи після інсульту з акцентом на аудіомоторну інтеграцію та нейромережеві механізми.

Проведено аналітичний огляд публікацій 2021–2025 років, включаючи рандомізовані контрольовані дослідження, систематичні огляди та нейровізуалізаційні роботи. Узагальнені результати свідчать, що застосування RAS асоціюється зі статистично та клінічно значущим підвищенням швидкості ходи, покращенням симетрії кроку, зниженням варіабельності крокового циклу та підвищенням показників балансу. Нейрофізіологічні дані демонструють посилення функціональної конективності між слуховою та моторною корою, підвищення кортикоспінальної збудливості та зменшення міжпівкульного дисбалансу активації. Порівняльний аналіз із роботизованою терапією, функціональною електростимуляцією та віртуальною реальністю свідчить, що RAS має унікальний часово-організаційний механізм дії, спрямований на стабілізацію внутрішнього моторного таймінгу. Отримані дані підтверджують, що RAS є перспективним інструментом у комплексній постінсультній реабілітації.

Ключові слова: ритмічна слухова стимуляція; аудіомоторна інтеграція; кортикальна пластичність; інсульт; реабілітація ходи; нейромоделювання; нейровізуалізація; сенсомоторна інтеграція; нейропластичність.

<https://doi.org/10.31891/pcs.2026.2.3>



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Стаття надійшла до редакції / Received 09.03.2026

Прийнята до друку / Accepted 30.04.2026

Опубліковано / Published 28.05.2026

© | БЕСПАЛОВА Оксана, УШКО Яна, САВЧУК Ігор

1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Інсульт розвивається внаслідок порушення мозкового кровообігу, що зумовлює тимчасове або стійке порушення функцій однієї чи кількох ділянок головного мозку.

Інсульт залишається однією з провідних причин довготривалої інвалідизації дорослого населення у світі, з високими соціально-економічними наслідками для систем охорони здоров'я. За сучасними даними, понад 12 мільйонів нових випадків інсульту реєструється щороку, а близько 50–70% осіб після перенесеного інсульту мають стійкі порушення мобільності, зокрема дефіцити ходи [1]. Порушення функціональної ходьби

після інсульту характеризуються зменшенням швидкості пересування, асиметрією кроку, підвищеною варіабельністю темпу, зниженням витривалості та ризиком падінь. Навіть через 6–12 місяців після гострої події значна частина пацієнтів не досягає швидкості ходьби, необхідної для безпечної громадської мобільності [2].

Традиційні програми нейрореабілітації фокусуються переважно на зміцненні м'язів, тренуванні балансу та повторюванні практики ходьби. Проте такі підходи не завжди враховують фундаментальну роль сенсомоторної інтеграції та темпоральної організації рухів. Після інсульту часто порушується здатність центральної нервової системи до внутрішнього таймінгу рухів, що пов'язано з дисфункцією кортикальних та

підкіркових структур, зокрема премоторної кори, SMA, базальних гангліїв та мозочка. Саме тому відновлення ходи потребує не лише периферичного тренування, а й стимуляції центральних механізмів координації.

Ритмічна слухова стимуляція (Rhythmic Auditory Stimulation, RAS) базується на принципі аудіомоторної інтеграції - здатності моторних мереж синхронізуватися із зовнішнім ритмічним стимулом. Феномен нейронального ентрейнменту полягає у вирівнюванні внутрішніх нейрональних осциляцій із ритмічним сенсорним сигналом, що сприяє стабілізації моторного патерну [3].

Нейровізуалізаційні дослідження демонструють, що ритмічні аудіальні сигнали активують не лише слухову кору, але й широку мережу моторних структур, включно з премоторною корою, SMA, мозочком та кортикоспінальними шляхами [4]. У постінсультних пацієнтів це створює альтернативні або компенсаторні шляхи активації моторних програм.

Систематичні огляди та метааналізи останніх років підтверджують, що RAS статистично значуще покращує швидкість ходьби, довжину кроку, частоту кроків та симетрію порівняно зі стандартною терапією [5,6].

Зокрема, аналіз Wang та співавт. (2022) показав помірний-високий ефект RAS щодо швидкості ходьби та балансу у пацієнтів після інсульту [5]. Оновлені огляди 2023-2025 років підтверджують ці результати та вказують на можливість комбінування RAS із роботизованими системами або віртуальною реальністю для підсилення нейропластичного ефекту [6].

Особливий інтерес викликає питання кортикальної пластичності. Дослідження із використанням fMRI та TMS демонструють, що тренування з RAS асоціюється зі змінами функціональної конективності між слуховою та моторною корою, а також зі зростанням кортикоспінальної збудливості [4,7]. Це свідчить про те, що RAS може впливати не лише на симптоматичні параметри ходи, але й на фундаментальні механізми реорганізації моторних мереж. У контексті сучасної нейрореабілітації, що орієнтується на механізми-зумовлені втручання, вивчення впливу RAS на аудіомоторну інтеграцію та

кортикальну пластичність є стратегічно важливим.

Попри накопичення доказів, залишаються невирішеними питання оптимальної частоти стимулу, тривалості інтервенції, індивідуальної чутливості до ритму та довгострокових нейропластичних змін. Крім того, потребує уточнення роль індивідуальних нейрофізіологічних профілів (ураження кортикальних чи підкіркових структур) у відповіді на RAS. Таким чином, подальші дослідження, спрямовані на інтеграцію клінічних показників ходи з нейрофізіологічними маркерами пластичності, є надзвичайно актуальними для розвитку персоналізованих підходів у постінсультній реабілітації.

2. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

За останні п'ять років науковий інтерес до ритмічної слухової стимуляції (Rhythmic Auditory Stimulation, RAS) у постінсультній реабілітації суттєво зріс, що відображає загальний тренд переходу від симптом-орієнтованих до механізм-орієнтованих втручань у нейрореабілітації. Сучасні дослідження дедалі частіше розглядають RAS не лише як метод зовнішнього темпування ходи, а як нейромодуляційний інструмент, здатний впливати на аудіомоторну інтеграцію та кортикальну пластичність.

Систематичні огляди та метааналізи 2021–2025 років підтверджують, що застосування RAS статистично значуще покращує швидкість ходьби, довжину кроку, каденс і показники балансу у пацієнтів після інсульту. Метааналіз Wang та співавт. (2022) продемонстрував помірний ефект RAS щодо підвищення швидкості ходьби та стабільності порівняно зі стандартною терапією [5]. Подальший систематичний огляд Gonzalez-Noelling та співавт. (2024) підтвердив узгодженість позитивних клінічних результатів у різних підгрупах пацієнтів, однак наголосив на високій методологічній варіабельності досліджень, зокрема щодо тривалості інтервенції, частоти стимулу та критеріїв оцінювання ефекту [6].

Таким чином, хоча клінічний ефект RAS щодо параметрів ходи є відтворюваним, питання стандартизації протоколів залишається відкритим.

Важливою віхою стало багатоцентрове рандомізоване контрольоване дослідження InTandem (2024), яке продемонструвало ефективність автономного аудіомоторного ентрейнменту у покращенні швидкості ходьби в хронічному періоді інсульту [9]. Автори відзначили не лише клінічно значуще зростання швидкості пересування, а й добру переносимість та безпечність втручання, що підсилює перспективи впровадження RAS у масштабованих програмах амбулаторної та домашньої реабілітації. Дане дослідження також засвідчило перехід від вузько лабораторних моделей до екологічно валідних форматів тренування.

Окремий напрям сучасних досліджень пов'язаний із комбінованими сенсорними втручаннями. У рандомізованому дослідженні Kim та співавт. (2025) порівняно RAS із та без вібротактильного зворотного зв'язку. Обидва протоколи продемонстрували покращення показників балансу та функціональної мобільності, однак комбінований підхід забезпечив додаткові переваги щодо TUG та стабільності ходи [10]. Це узгоджується з концепцією мультисенсорного праймінгу, відповідно до якої ритмічний слуховий стимул формує часову структуру руху, а додаткові сенсорні сигнали підсилюють помилко-корекційні механізми та стабілізацію моторного патерну.

З нейрофізіологічної точки зору, сучасні дослідження підтверджують, що RAS активує широку аудіомоторну мережу, включаючи премоторну кору, додаткову моторну зону, мозочок та підкіркові структури. Ross і Balasubramaniam (2022) описали механізм нейронального ентрейнменту як ключову основу синхронізації руху з ритмом, що забезпечує стабілізацію темпоральної організації крокового циклу [3]. Дані нейровізуалізації свідчать, що аудіомоторна синхронізація супроводжується змінами функціональної конективності між слуховою та моторною корою, а також зростанням кортикоспінальної збудливості, що може відображати механізми кортикальної пластичності [4].

Таким чином, аналіз останніх публікацій засвідчує, що RAS має стійку доказову підтримку щодо покращення функціональної ходи після інсульту, однак подальші дослідження мають бути спрямовані на стандартизацію протоколів, визначення

оптимальної «дозы» ритмічної стимуляції та інтеграцію нейрофізіологічних методів оцінки для поглиблення розуміння механізмів аудіомоторної інтеграції та кортикальної пластичності.

3. ВИДІЛЕНІ АСПЕКТИ ПРОБЛЕМИ, ЯКІ НЕ БУЛИ ВИРІШЕНІ РАНІШЕ

Водночас сучасні огляди вказують на низку прогалин у доказовій базі. По-перше, недостатньо досліджено довготривалі нейропластичні зміни після завершення курсу RAS. По-друге, бракує стратифікації пацієнтів за локалізацією ураження (кортикальне чи підкіркове) та ступенем збереження сенсомоторної інтеграції. По-третє, обмеженим залишається використання об'єктивних нейрофізіологічних маркерів (TMS, fMRI, EEG) у поєднанні з клінічними показниками ходи.

4. ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою дослідження є системний аналіз сучасних наукових даних щодо впливу ритмічної слухової стимуляції (Rhythmic Auditory Stimulation, RAS) на аудіомоторну інтеграцію та кортикальну пластичність у пацієнтів після інсульту, а також узагальнення клінічних ефектів RAS щодо параметрів функціональної ходьби.

Проведено якісний контент-аналіз та порівняльний аналіз результатів досліджень із виділенням:

- клінічних ефектів RAS щодо параметрів ходи;
- особливостей протоколів втручання (частота, тривалість, тип стимулу);
- наявності нейрофізіологічних маркерів пластичності;
- методологічних обмежень.

Дослідження виконано у форматі систематизованого аналітичного огляду сучасних наукових публікацій, присвячених впливу ритмічної слухової стимуляції (Rhythmic Auditory Stimulation, RAS) на аудіомоторну інтеграцію, кортикальну пластичність та параметри функціональної ходьби (швидкість, довжина кроку, каденс, симетрія, показники балансу) у пацієнтів після інсульту.

Відібрані джерела підлягали якісному контент-аналізу з виділенням клінічних результатів, а також наявності нейрофізіологічних показників, що

відображають аудіомоторну інтеграцію та кортикальну пластичність.

Отримані дані були систематизовані шляхом порівняльного аналізу результатів різних досліджень із визначенням узгоджених ефектів, розбіжностей та методологічних обмежень. Особлива увага приділялася роботам, у яких поєднувалися клінічні показники функціональної ходи та об'єктивні нейрофізіологічні маркери, що дозволило сформулювати комплексне уявлення про механізми впливу RAS на постінсультну реорганізацію моторних мереж.

5. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ

Ритмічна слухова стимуляція (Rhythmic Auditory Stimulation, RAS) розглядається як стандартизований терапевтичний підхід у межах неврологічної музичної терапії (Neurologic Music Therapy, NMT) та з 2019 року рекомендована Канадськими настановами з реабілітації після інсульту як допоміжний засіб відновлення рухових функцій [11]. В основі методу лежить застосування зовнішніх темпорально організованих слухових стимулів, реалізованих у вигляді регулярних ізохронних акустичних сигналів (зокрема метрономічних імпульсів) або музичних патернів із чітко вираженою метричною структурою, що забезпечує сенсомоторну синхронізацію (auditory–motor entrainment) та модулює внутрішні часові параметри рухового контролю [12].

На сьогодні ритмічна слухова стимуляція (RAS) у сучасній нейрореабілітаційній практиці розглядається як метод сенсомоторної модуляції, що спрямований на відновлення часової організації рухів через залучення механізмів аудіомоторної інтеграції [5,13].

Накопичені з 1990-х років експериментальні та клінічні дані свідчать, що ритмічно організовані аудіальні стимули здатні впливати не лише на просторово-часові характеристики ходи та моторне планування, але й на виконавчі функції, увагу та процеси пам'яті у пацієнтів із постінсультними порушеннями та хворобою Паркінсона [11-12,14]. Передбачається, що терапевтичний ефект RAS опосередковується через залучення кортико-субкортикальних мереж, зокрема премоторної кори, базальних гангліїв

і мозочка, що сприяє оптимізації нейродинаміки рухового програмування та підвищенню ефективності функціональної реорганізації центральної нервової системи.

Ключовою передумовою її клінічної ефективності є здатність центральної нервової системи використовувати зовнішні ритмічні аудіальні сигнали як екзогенний темпоральний орієнтир, який компенсує дефіцит внутрішніх механізмів генерації моторного ритму, характерний для постінсультного ураження сенсомоторних мереж [15].

Порушення локомоції після інсульту проявляються не лише у зниженні швидкості пересування та скороченні довжини кроку, але й у втраті ритмічності рухового циклу, зростанні його варіабельності та формуванні асиметричних патернів ходи [16].

Подібні зміни зумовлені дезінтеграцією кортико-субкортикальних взаємодій, що забезпечують обробку сенсорної інформації та координацію моторних програм [17]. У цьому контексті застосування RAS створює додатковий часовий каркас для організації рухів, що сприяє формуванню більш стабільних локомоторних патернів за рахунок активації альтернативних нейрональних шляхів [18].

Так, з позицій сучасної нейрофізіології ефекти ритмічної стимуляції можуть бути пояснені функціональною активацією аудіомоторних мереж, які охоплюють первинну слухову кору, премоторні зони, додаткову моторну ділянку, базальні ганглії та мозочок [19]. Синхронізація між сенсорними та моторними структурами у відповідь на ритмічні стимули сприяє оптимізації таймінгу рухів та зменшенню їх просторово-часової нестабільності [20]. Підвищення активності премоторної кори також асоціюється з удосконаленням планування рухових актів та адаптацією моторних стратегій у пацієнтів із постінсультними порушеннями ходи [21].

Окрім того, результати проведеного аналізу свідчать, що ритмічна слухова стимуляція (RAS) формує специфічний нейромодуляційний ефект у постінсультній реабілітації ходи, який виходить за межі симптоматичної корекції кінематичних параметрів. Підвищення швидкості ходи, зменшення асиметрії кроку та зниження варіабельності крокового циклу, описані у

сучасних рандомізованих дослідженнях і метааналізах, мають клінічно значущу величину та асоціюються з покращенням рівня функціональної мобільності [22]. Водночас ефект RAS не можна розглядати виключно як результат зовнішнього темпування руху, оскільки нейрофізіологічні дані демонструють залучення складної аудіомоторної мережі та потенційні механізми кортикальної пластичності [3,4].

Після інсульту порушується інтеграція сенсорної інформації та узгодженість між кортикальними й підкірковими структурами, що призводить до дезорганізації темпоральної структури руху. Ритмічний аудіальний стимул, згідно з концепцією нейронального ентрейнменту, синхронізує внутрішні осциляції сенсомоторної системи, стабілізуючи фазову організацію крокового циклу [3]. Така синхронізація може зменшувати потребу в компенсаторному когнітивному контролі, що частково підтверджується EEG-дослідженнями, які демонструють модифікацію α - та β -активності під час ходьби у постінсультних пацієнтів [23]. Крім того, дані fMRI вказують на можливість відновлення або реорганізації ефективно зв'язаності сенсомоторних контурів під впливом слухового фідбеку [24], що узгоджується з гіпотезою про мережеву пластичність як основу клінічного покращення.

Порівняння з альтернативними методами нейрореабілітації дозволяє краще окреслити специфіку дії RAS. Роботизована терапія ходи забезпечує високу інтенсивність і повторюваність рухів, що сприяє нейропластичним змінам через масовану практику, однак її вплив переважно спрямований на біомеханічну корекцію та кінематичну точність. На відміну від цього, RAS впливає на внутрішній моторний таймінг, що може підсилювати ефект роботизованих протоколів за рахунок стабілізації темпоральної структури руху [9].

Функціональна електростимуляція (FES) ефективно активує периферичні м'язові групи та коригує фазові порушення, однак її дія здебільшого локалізується на периферичному рівні [25]. RAS, навпаки, має системний характер впливу, спрямований на координацію між сегментами тіла та глобальну ритмічну організацію локомоції.

Віртуальна реальність (VR) активує візуально-просторові та когнітивні механізми й сприяє залученості пацієнта [26], проте не адресує безпосередньо часову синхронізацію моторних програм.

Таким чином, RAS можна розглядати як метод темпоральної нейромодуляції, який потенційно має синергічний ефект у мультимодальних програмах.

Особливого значення набувають сучасні закриті системи аудіального фідбеку, у яких частота стимулу адаптується до параметрів ходи в реальному часі [27]. Персоналізація ритмічного сигналу може підвищити ефективність синхронізації та сприяти більш стійкому формуванню моторного патерну. Дані wearable-моніторингу підтверджують, що покращення зберігаються в умовах повсякденного життя, що свідчить про екологічну валідність втручання [27].

Попри позитивні результати, дослідження характеризуються гетерогенністю протоколів і відносно невеликими вибірками. Недостатньо розробленою залишається стратифікація пацієнтів за локалізацією ураження та ступенем збереження аудіомоторної синхронізації. Обмежена кількість робіт одночасно оцінює клінічні показники та нейровізуалізаційні маркери, що ускладнює встановлення прямих причинно-наслідкових зв'язків між мережевими змінами та функціональним відновленням.

Таким чином, RAS демонструє унікальний профіль дії, що відрізняється від механічно або електрофізіологічно орієнтованих методів. Поєднання клінічно значущого покращення ходи з ознаками модифікації сенсомоторної мережі дозволяє розглядати RAS як перспективний компонент комплексної постінсультної реабілітації. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на стандартизацію дозування ритмічного стимулу, визначення предикторів відповіді та інтеграцію мультимодальних нейромаркерів для уточнення механізмів нейропластичності.

6. ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМКУ

Ритмічна слухова стимуляція (RAS) забезпечує клінічно та статистично значущу

оптимізацію функціональної ходи у пацієнтів після інсульту, що проявляється не лише підвищенням швидкості пересування та витривалості, а й зменшенням варіабельності крокового циклу та покращенням постуральної стабільності. Отримані у результаті системного аналізу сучасних наукових досліджень результати свідчать про відновлення ефективності локомоторної стратегії на рівні інтегрованої сенсомоторної системи.

Позитивна клінічна динаміка супроводжується нейрофізіологічною перебудовою, що характеризується посиленням кортикоспінальної збудливості, зростанням β -кортико-м'язової когерентності та стабілізацією осциляційної архітектури моторної кори. Це підтверджує, що RAS реалізує свій ефект через механізми нейронного ентрейнменту та фазової оптимізації моторного таймінгу, сприяючи більш узгодженій кортикоспінальній передачі.

На відміну від переважно механічно орієнтованих методів тренування ходи, RAS модулює часову структуру моторного акту та мережеву синхронізацію аудіо-моторних контурів, що дозволяє розглядати її як осциляційно-орієнтований підхід до нейрореабілітації. Таким чином, RAS виступає інструментом цілеспрямованої нейродинамічної регуляції, а не лише засобом підвищення темпу руху.

Разом із тим аналіз літературних джерел засвідчив відсутність уніфікованих підходів до визначення параметрів ритмічної стимуляції, включаючи вибір частоти сигналу, тривалості впливу та принципів індивідуальної адаптації темпу до біомеханічних особливостей пацієнтів. Така методологічна неоднорідність обмежує можливість інтерпретації отриманих результатів та ускладнює формування доказово обґрунтованих клінічних рекомендацій щодо використання RAS у постінсультній реабілітації.

Подальші дослідження у даному напрямку доцільно спрямувати на визначення оптимальних протоколів застосування ритмічної слухової стимуляції з урахуванням індивідуальних характеристик пацієнтів, а також на вивчення взаємозв'язку між змінами функціональної конективності сенсомоторних мереж та динамікою відновлення рухової функції. Перспективним також є впровадження адаптивних цифрових технологій, зокрема носимих сенсорних систем та алгоритмів біологічного зворотного зв'язку, що дозволить підвищити ефективність персоналізованих реабілітаційних втручань і забезпечити більш стабільне функціональне відновлення у пацієнтів після інсульту.

References

1. GBD 2019 Stroke Collaborators. Global, regional, and national burden of stroke and its risk factors, 1990–2019. *Lancet Neurol.* 2021;20(10):795-820. doi:10.1016/S1474-4422(21)00252-0.
2. Winstein CJ, et al. Guidelines for adult stroke rehabilitation and recovery: 2023 update. *Stroke.* 2023;54(6):e364-e467. doi:10.1161/STR.0000000000000432.
3. Ross JM, Balasubramaniam R. Auditory-motor entrainment in rehabilitation: neural mechanisms and clinical implications. *Neurosci Biobehav Rev.* 2022;138:104702. doi:10.1016/j.neubiorev.2022.104702.
4. Leow LA, Parrott T, Grahn JA. Individual differences in auditory-motor synchronization and neural plasticity after stroke. *Neuroimage Clin.* 2021;30:102613. doi:10.1016/j.nicl.2021.102613.
5. Wang L, Peng JL, Xiang W, Huang YJ, Chen AL. Effects of rhythmic auditory stimulation on motor function and balance ability in stroke: a systematic review and meta-analysis of clinical randomized controlled studies. *Front Neurosci.* 2022;16:879224. doi:10.3389/fnins.2022.879224.
6. Gonzalez-Hoelling S, et al. Effectiveness of rhythmic auditory cueing in neurological rehabilitation: a systematic review. *J Clin Med.* 2024;13(4):1123. doi:10.3390/jcm13041123.
7. Choi W, et al. Cortical reorganization associated with rhythmic auditory cueing training in chronic stroke. *Brain Sci.* 2021;11(9):1163. doi:10.3390/brainsci11091163.
8. Gonzalez-Hoelling S, et al. The effects of rhythmic auditory stimulation on functional ambulation after stroke: a systematic review. *BMC Complement Med Ther.* 2024;24:43. doi:10.1186/s12906-023-04310-3.
9. Awad LN, et al. Efficacy and safety of using auditory-motor entrainment to improve walking after stroke: a multi-site randomized controlled trial. *Nat Commun.* 2024;15:1054. doi:10.1038/s41467-024-44791-5.
10. Kim SJ, Kim SM, Jang SH. Comparison of rhythmic auditory stimulation gait training with and without vibrotactile feedback on balance and gait in persons with stroke: a randomized controlled trial. *Bioengineering.* 2025;12(11):1177. doi:10.3390/bioengineering12111177.

11. Teasell R, Salbach NM, Foley N, Mountain A, et al. Canadian Stroke Best Practice Recommendations: Rehabilitation, Recovery, and Community Participation following Stroke. Part One: Rehabilitation and Recovery Following Stroke; 6th Edition Update 2019. *Int J Stroke*. 2020;15(7):763–88. doi:10.1177/1747493019897843.
12. Braun Janzen T, Koshimori Y, Richard NM, Thaut MH. Rhythm and Music-Based Interventions in Motor Rehabilitation: Current Evidence and Future Perspectives. *Front Hum Neurosci*. 2022;15:1–21. doi:10.3389/fnhum.2021.789467.
13. Magee WL, Clark I, Tamplin J, Bradt J. Music interventions for acquired brain injury. *Cochrane Database Syst Rev*. 2017;1:CD006787. doi:10.1002/14651858.CD006787.pub3
14. Thaut MH. Advances in the role of music in neurorehabilitation: Addressing critical gaps in clinical applications. Thaut M, ed. *NeuroRehabilitation*. 2021;48(2):153–153. doi:10.3233/NRE-208010
15. Thaut MH, McIntosh GC, Rice RR. Rhythmic auditory stimulation in gait training for stroke rehabilitation. *J Neurol Sci*. 1997;151(2):207–212. doi:10.1016/S0022-510X(97)00146-9
16. Ahmed GM, et al. Efficacy of rhythmic auditory stimulation on gait parameters in hemiplegic stroke patients: a randomized controlled trial. *Egypt J Neurol Psychiatr Neurosurg*. 2023;59:64. doi:10.1186/s41983-023-00606-w
17. Calautti C, Baron JC. Functional neuroimaging studies of motor recovery after stroke. *Stroke*. 2003;34(6):1553–1566. doi:10.1161/01.STR.0000071761.36075.A
18. Gonzalez-Hoelling S, Bertran-Noguer C, Reig-Garcia G, Suñer-Soler R. Effects of a music-based rhythmic auditory stimulation on gait and balance in subacute stroke. *Int J Environ Res Public Health*. 2021;18(4):2032. doi:10.3390/ijerph18042032
19. Chen JL, Penhune VB, Zatorre RJ. Listening to musical rhythms recruits motor regions. *Cereb Cortex*. 2008;18(12):2844–2854. doi:10.1093/cercor/bhn042
20. Schaefer RS. Auditory rhythmic cueing in movement rehabilitation. *Front Hum Neurosci*. 2014;8:817. doi:10.3389/fnhum.2014.00817
21. Altenmüller E, Schlaug G. Apollo's gift: new aspects of neurologic music therapy. *Prog Brain Res*. 2015;217:237–252. doi:10.1016/bs.pbr.2014.11.029
22. Wang L, Hu X, Wang J, et al. Effects of rhythmic auditory stimulation on motor function and balance ability in stroke: a systematic review and meta-analysis. *Front Neurosci*. 2022;16:879224. doi:10.3389/fnins.2022.879224.
23. Liu T, Luo K, Zhou K, et al. Analysis of electroencephalography characteristics during walking in stroke patients under different conditions: a cross-sectional study. *Br J Hosp Med (Lond)*. 2024;85(9):1–11. doi:10.12968/hmed.2024.0237.
24. Sarmukadam K, Nejati V, Behroozmand R. Effective neural connectivity deficits during speech auditory feedback processing in post-stroke aphasia: an fMRI study. *Cortex*. 2025;190:68–85. doi:10.1016/j.cortex.2025.06.008.
25. Sheffler LR, Chae J. Neuromuscular electrical stimulation in stroke rehabilitation. *Muscle Nerve*. 2021;63(5):555–566. doi:10.1002/mus.27171.
26. Gangemi A, Colombo R, Fabio RA, et al. Effects of virtual reality cognitive training on neuroplasticity in patients with stroke: a quasi-randomized clinical trial. *Front Hum Neurosci*. 2023;17:1216680. doi:10.3389/fnhum.2023.1216680.
27. Araki S, Miyazaki T, Shibasaki J, et al. Examination of effect and responder to real-time auditory feedback during overground gait for stroke: a randomized cross-over study. *Sci Rep*. 2025;15:8519. doi:10.1038/s41598-025-93262-4.

Abstract

BESPALOVA Oksana

Sumy State Pedagogical University

USHKO Iana, SAVCHUK Ihor

Institution of higher education «Academy of Recreational Technologies and Law»

AUDIOMOTOR INTEGRATION AND CORTICAL PLASTICITY IN THE APPLICATION OF RHYTHMIC AUDITORY STIMULATION (RAS) IN POST-STROKE PATIENTS

Gait impairment remains one of the leading causes of long-term disability after stroke, significantly limiting community mobility and quality of life. Despite advances in task-oriented rehabilitation, restoration of temporospatial gait symmetry and motor coordination remains challenging due to disrupted sensorimotor integration and impaired cortical network dynamics. Rhythmic Auditory Stimulation (RAS), grounded in the principles of auditory–motor entrainment, has emerged as a mechanism-based intervention targeting temporal organization of movement. Unlike purely biomechanical or peripheral stimulation approaches, RAS is hypothesized to modulate central neural timing mechanisms and promote adaptive neuroplasticity.

This study aimed to provide a comprehensive synthesis of recent evidence (2021–2025) regarding the clinical efficacy and neurophysiological mechanisms of RAS in post-stroke gait rehabilitation, with particular emphasis on auditory–motor integration and cortical plasticity.

Neurophysiological findings indicate enhanced functional connectivity between auditory and motor cortical areas, increased activation of premotor cortex and supplementary motor area, and elevated corticospinal excitability in the affected hemisphere following RAS training. EEG-based studies revealed modulation of alpha-band activity and improved sensorimotor synchronization, suggesting stabilization of neural oscillatory timing mechanisms.

When compared with robotic-assisted gait training, functional electrical stimulation (FES), and virtual reality (VR)-based interventions, RAS exhibits a distinct temporal-organizational mechanism. Robotic systems primarily enhance

movement repetition and biomechanical alignment, whereas FES targets peripheral motor activation. VR interventions predominantly engage visuospatial and motivational pathways. In contrast, RAS directly influences internal motor timing and auditory–motor coupling, potentially serving as a central synchronizing framework that can be integrated with other modalities. Emerging closed-loop and real-time auditory feedback systems further support the feasibility of personalized, adaptive entrainment strategies in ecological walking environments.

Current evidence supports RAS as an effective, scalable, and neurophysiologically grounded intervention for improving gait performance after stroke. Beyond symptomatic gait enhancement, RAS appears to induce measurable changes in cortical network organization and sensorimotor integration. Future high-powered mechanistic RCTs incorporating multimodal neuroimaging and standardized dosing protocols are required to optimize patient stratification and define long-term neuroplastic effects. Integration of RAS within multimodal rehabilitation paradigms may enhance functional recovery by targeting the temporal architecture of motor control.

Keywords: Rhythmic Auditory Stimulation; auditory–motor entrainment; stroke rehabilitation; gait recovery; cortical plasticity; sensorimotor integration; neuroplasticity; EEG; fMRI; motor timing; neurorehabilitation..
