

©Д. П. Коваль <https://orcid.org/0009-0000-0085-0134>
©Д. В. Попович <https://orcid.org/0000-0002-5142-2057>

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

ВИКОРИСТАННЯ НОВІТНІХ ТЕХНОЛОГІЙ ДОПОВНЕНОЇ ТА ВІРТУАЛЬНОЇ РЕАЛЬНОСТІ У ФІЗИЧНІЙ РЕАБІЛІТАЦІЇ

РЕЗЮМЕ. Стаття присвячена аналізу ефективності застосування технологій доповненої (AR) та віртуальної реальності (VR) у фізичній реабілітації. Актуальність роботи зумовлена швидким розвитком цифрової медицини та потребою в упровадженні інноваційних підходів до відновлення пацієнтів із неврологічними й ортопедичними порушеннями.

Метою дослідження є узагальнення сучасних наукових даних щодо ефективності застосування технологій доповненої (AR) та віртуальної реальності (VR) у фізичній реабілітації, аналіз механізмів їх терапевтичної дії, а також формування практичних рекомендацій щодо параметрів використання та безпечності таких інтервенцій у клінічній практиці.

Матеріал і методи. У роботі використано дані систематичних оглядів, мета-аналізів та рандомізованих контрольованих досліджень, опублікованих у провідних базах даних (PubMed, Scopus, Web of Science) та фахових виданнях Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, Sensors, Journal of Clinical Medicine тощо. Аналіз охопив публікації останнього десятиріччя. Методи дослідження включали аналітичний, порівняльний та узагальнювальний підходи для оцінки клінічної ефективності, безпечності й організаційних аспектів застосування AR/VR у реабілітації.

Результати. Встановлено, що використання AR і VR сприяє активації нейропластичності, удосконаленню моторних функцій, розвитку компенсаторних навичок і підвищенню мотивації пацієнтів завдяки гейміфікації. Ефективність доведено при постінсультній реабілітації, хворобі Паркінсона, ортопедичних ураженнях, хронічному болю та в дитячій реабілітації. Оптимальними параметрами інтервенції є 20–30 хвилин тричі на тиждень упродовж 4–8 тижнів. Виявлено необхідність поєднання VR із традиційними методами терапії та ретельного контролю переносимості, особливо через ризик кіберхвороби. Організаційними бар'єрами залишаються висока вартість обладнання й потреба у спеціальній підготовці персоналу.

Висновки. AR і VR є перспективними інструментами сучасної фізичної реабілітації, які підвищують ефективність відновлювальних програм та якість життя пацієнтів. Упровадження цих технологій потребує стандартизації клінічних протоколів, міждисциплінарної підготовки фахівців і подальших багатоцентрових досліджень для оцінки їх довгострокової ефективності та економічної доцільності.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: інтерактивне візуальне моделювання; комп'ютерно змодельоване середовище; реабілітаційна терапія; нейрореабілітація, гейміфікація, клінічні протоколи, відновлення моторики, цифрове здоров'я.

Вступ. За останнє десятиліття цифрові технології суттєво трансформували клінічну практику, і фізична реабілітація не стала винятком. Інструменти AR і VR дозволяють змінювати візуальний та мотиваційний контекст терапії, систематизувати збір цифрових даних про рух, забезпечувати мультимодальний зворотний зв'язок та створювати адаптивні програми тренувань [1]. Синергія традиційних терапевтичних принципів, таких як повтори, цілеспрямованість та поступове збільшення навантаження, із можливостями комп'ютерного моделювання, гейміфікації та автоматичного відстеження відкриває нові перспективи підвищення інтенсивності та якості відновлення функцій. Водночас на практиці виникають питання стандартизації протоколів, безпеки пацієнтів, їхньої переносимості до імерсивних середовищ та економічної доцільності широкого впровадження.

Мета дослідження – проаналізувати наявні докази ефективності AR/VR у фізичній реабілітації, описати механізми дії, стандартизувати рекомендовані параметри інтервенцій і запропонувати практичні протоколи для ключових нозологій.

Матеріал і методи дослідження. Методологічною основою дослідження став аналіз сучасних систематичних оглядів, мета-аналізів, рандомізованих контрольованих досліджень, а також національних клінічних протоколів у сфері фізичної та нейрореабілітації. Пошук і добір джерел здійснювався у провідних наукових базах даних, серед яких PubMed, Scopus, Web of Science, а також у відкритих ресурсах міжнародних фахових видань, таких як Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, Journal of Clinical Medicine, Sensors, Advances in Rehabilitation. Основну увагу приділяли публікаціям останнього десятиріччя, адже

саме за цей період відбулося активне впровадження технологій доповненої та віртуальної реальності у клінічну практику.

При відборі літератури враховували кілька критеріїв. Передусім це відповідність тематиці – розглядалися роботи, які безпосередньо стосувалися застосування AR і VR у фізичній реабілітації, а не в інших галузях медицини чи освіти. Важливим був і методологічний рівень: пріоритет надавався дослідженням із чітко описаним дизайном, наявністю контрольних груп та об'єктивними інструментами оцінки результатів. Окремо відзначали наукові праці, що поєднували клінічні спостереження із використанням цифрових метрик, оскільки саме це дає змогу оцінювати ефективність технологій більш комплексно.

Аналіз проводився за принципом поступового звуження досліджуваного поля: від загальних характеристик і класифікації технологій до конкретних клінічних доказів і практичних протоколів. Спочатку було описано основні типи систем залежно від рівня занурення та технічних можливостей, далі розглянуто механізми їх терапевтичного впливу, після чого здійснено узагальнення результатів клінічних випробувань за основними нозологіями. Заключним етапом стала розробка практичних рекомендацій щодо параметрів застосування та безпеки використання AR/VR у реабілітації.

Для оцінки ефективності у включених дослідженнях використовувалися як традиційні клінічні інструменти, так і сучасні цифрові показники. Серед клінічних шкал найпоширенішими були Fugl-Meyer Assessment, Action Research Arm Test, Berg Balance Scale, Timed Up and Go, а також тести на швидкість та витривалість ходи (10-метровий тест, 6-хвилинний тест). Поряд із цим програмне забезпечення VR-систем дозволяло фіксувати об'єктивні параметри виконання завдань: кількість повторів, амплітуду рухів, час реакції, точність дій. Поєднання суб'єктивної оцінки клініциста із кількісними цифровими даними розглядалося як оптимальний підхід до моніторингу прогресу.

У ході відбору та аналізу враховувалися також етичні аспекти проведення досліджень. Значна частина робіт містила дані про отримання інформованої згоди пацієнтів, дотримання міжнародних стандартів біоетики, а також про заходи безпеки, спрямовані на мінімізацію побічних ефектів, серед яких найчастіше траплялися запаморочення, нудота та симптоми кіберхвороби. Саме ці фактори були важливими для узагальнення практичних рекомендацій щодо безпечно-го застосування AR та VR у процесі реабілітації.

Методи дослідження базувалися на багаторівневому аналізі літератури, який поєднував

систематизацію теоретичних відомостей, узагальнення результатів клінічних випробувань та критичну оцінку безпекових і організаційних аспектів впровадження технологій у практику.

Результати й обговорення. Результати аналізу наукових джерел засвідчили, що механізми терапевтичного впливу технологій доповненої та віртуальної реальності мають багатокомпонентний характер. Передусім вони ґрунтуються на здатності стимулювати нейропластичність через інтенсивність і повторюваність завдань. Використання VR створює умови для більшої кількості вправ за одиницю часу, порівняно з традиційними методами, що забезпечує активізацію процесів відновлення уражених ділянок нервової системи. Додаткову роль відіграє багаточуттєвий зворотний зв'язок: сучасні системи дозволяють пацієнтам отримувати миттєві сигнали не лише візуального, а й аудіального, а подекуди й тактильного характеру. Це сприяє точнішій корекції рухів і формуванню більш адекватних моторних патернів. Важливим чинником виявляється й використання елементів гейміфікації, адже ігрові завдання, нагороди чи індикатори прогресу підвищують мотивацію пацієнтів, роблять заняття привабливими й зменшують ризик відмови від тривалої терапії. Нарешті, VR і AR дають змогу симулювати реальні побутові дії, що створює можливості для перенесення сформованих навичок у повсякденне життя.

Класифікація технологій показує, що вони відрізняються передусім рівнем занурення користувача у віртуальне середовище. Найпростішими є нон-іммерсивні рішення – використання звичайних екранів чи ігрових консолей. Вони є доступними та дешевими, проте не забезпечують достатнього ефекту присутності. Складнішими є семі-іммерсивні платформи, які працюють за допомогою інтерактивних панелей чи проєкційних систем. Найвищий рівень взаємодії створюють іммерсивні технології, що використовують VR-шоломи та дозволяють повністю зануритися у віртуальний простір. Особливу групу становлять AR-гарнітури, котрі накладають цифрові об'єкти на реальний простір. Це робить їх корисними для тренування повсякденних навичок і дає змогу поєднувати реальні рухи із цифровими підказками.

Доказова база свідчить, що VR і AR мають позитивний ефект при багатьох клінічних нозологіях. У постінсультній реабілітації численні дослідження демонструють покращення функцій верхніх кінцівок, поліпшення рівноваги та здатності виконувати повсякденні дії. Найбільш значущих результатів вдається досягти при поєднанні традиційної терапії та VR-тренувань. У пацієнтів із хворобою Паркінсона використання цих техноло-

гій покращує ходу, допомагає відпрацьовувати навички реакції на перешкоди, а також тренує здатність до виконання двох завдань одночасно [4]. Однак для підтвердження стабільності ефекту потрібні довготривалі дослідження. Для пацієнтів із хронічним болем VR використовується як немедикаментозна стратегія відволікання, що знижує інтенсивність больових відчуттів і водночас включає елементи психоосвіти та когнітивно-поведінкової терапії. В ортопедії після ендопротезування суглобів чи при остеоартрозі VR-тренування сприяють зменшенню больового синдрому, прискорюють відновлення амплітуди рухів і покращують силу м'язів. Особливо перспективною є дитяча реабілітація: завдяки ігровим формам заняття викликають зацікавлення у дітей з ДЦП та іншими моторними порушеннями, що стимулює регулярність і тривалість вправ.

Щодо практичних параметрів інтервенції, то більшість досліджень підтверджують доцільність початкових коротких сесій тривалістю 10–15 хвилин під наглядом спеціаліста з подальшим поступовим збільшенням тривалості та складності вправ. Основний курс зазвичай триває від чотирьох до восьми тижнів, при цьому середня тривалість занять становить 20–30 хвилин тричі на тиждень [3]. Для більш складних випадків допускається індивідуалізація протоколу із поступовим нарощуванням навантаження. Важливою умовою є постійний моніторинг стану пацієнта: оцінка переносимості занять, виявлення можливих симптомів кіберхвороби, а також контроль артеріального тиску та частоти серцевих скорочень у пацієнтів із кардіологічними ризиками [5].

Практичні приклади протоколів показують, що підхід може суттєво відрізнятись залежно від діагнозу. Так, при постінсультній реабілітації верхніх кінцівок на першому тижні проводять кілька тестових сесій, далі протягом наступних чотирьох тижнів організовують регулярні тренування по 20–30 хвилин тричі на тиждень із поступовим ускладненням вправ, а в завершальний період вводять двозадачні завдання для підвищення когнітивного навантаження. Для хвороби Паркінсона акцент робиться на тренуванні ходи у віртуальному середовищі, де пацієнт має долати перешкоди та реагувати на сигнали [6]. У випадку хронічного болю застосовуються VR-програми з відволікаючими візуальними сценаріями та елементами когнітивно-поведінкової терапії, які допомагають навчитися контролювати больові відчуття. Для дітей із порушеннями моторики протоколи будуються за іншим принципом: короткі, але більш часті заняття, тривалістю 8–15 хвилин кілька разів на тиждень із яскравими ігровими завданнями, що відповідають рівню розвитку уваги.

Не менш важливими є питання відбору пацієнтів та визначення протипоказань. Перед початком курсу необхідно оцінити загальний стан здоров'я, зокрема кардіологічні показники, наявність епілепсії чи тяжких вестибулярних порушень, а також психічний статус. Гострі стани, неконтрольовані судоми чи тяжкі когнітивні порушення можуть стати протипоказанням для застосування VR/AR. У разі використання шоломів обов'язковим є забезпечення безпечного простору та нагляд терапевта на перших етапах [2].

Для оцінки ефективності поєднуються клінічні шкали та цифрові показники, які надають комплексне уявлення про прогрес пацієнта. Клінічні шкали відображають значні функціональні зміни, тоді як цифрові метрики дозволяють зафіксувати навіть незначні покращення в амплітуді рухів чи точності виконання завдань. Регулярні заміри на початку, у середині та наприкінці курсу дозволяють не лише відстежити динаміку, а й своєчасно коригувати програму.

Організаційні та етичні аспекти залишаються актуальними бар'єрами для широкого впровадження технологій. Питання вибору обладнання залежить від фінансових можливостей установи: доступні ігрові консолі можуть стати першим кроком, однак клінічно валідовані VR-системи забезпечують вищу точність і можливість інтеграції з іншими пристроями. Важливим є і навчання персоналу, який має не лише технічні знання, а й розуміння, як поєднувати VR-технології з традиційними методами реабілітації [7]. Серед етичних викликів – забезпечення захисту персональних даних пацієнтів, отримання інформованої згоди, а також контроль за можливими побічними ефектами. Економічна складова пов'язана з високою вартістю обладнання та програмного забезпечення, проте в довгостроковій перспективі такі інвестиції можуть зменшити витрати завдяки скороченню тривалості лікування і зниженню кількості повторних госпіталізацій.

Висновки. Проведений аналіз дає підстави стверджувати, що технології доповненої та віртуальної реальності можуть слугувати ефективним доповненням до традиційних методів фізичної терапії. Найбільш переконливі результати на сьогодні спостерігаються у сфері постінсультної реабілітації, де VR-тренування сприяють відновленню функцій верхньої кінцівки та покращенню балансу, а також у роботі з пацієнтами, які страждають на хворобу Паркінсона, де технології допомагають удосконалювати ходу та стабільність. Разом з тим очевидно, що успіх значною мірою залежить від індивідуалізації протоколів. Важливо враховувати переносимість занять, поступово нарощувати інтенсивність вправ, а також

поєднувати VR із класичними методиками реабілітації, аби досягти стійкого та клінічно значущого результату.

Окремої уваги потребує питання оцінки ефективності таких втручань. Комбінація клінічних шкал і цифрових метрик створює більш цілісну картину прогресу пацієнта, адже дозволяє одночасно фіксувати великі функціональні зміни та відслідковувати тонкі параметри рухової активності. Попри значний потенціал, ключовими перешкодами залишаються висока вартість обладнання, необхідність підготовки персоналу та обмежена кількість довготривалих досліджень, які б дозволили однозначно підтвердити стабільність ефектів у віддаленій перспективі.

Перспективи подальших досліджень. Перспективним напрямом майбутніх робіт є створення стандартизованих протоколів для окремих груп пацієнтів, зокрема для осіб із помірними чи тяжкими руховими порушеннями після інсульту. Не менш важливим завданням є інтеграція VR-технологій із робототехнічними комплексами та системами штучного інтелекту, які здатні автоматично підбирати вправи, адаптовані до поточного стану пацієнта. Подальший розвиток галузі не-

можливий без проведення багатоцентричних клінічних досліджень, що дозволять оцінити не лише терапевтичний ефект, а й економічну доцільність застосування таких технологій у широкій практиці.

Особливу увагу слід приділити розробці доступних платформ для телереабілітації, які могли б використовуватися у домашніх умовах під дистанційним наглядом спеціаліста. Такі рішення мають гарантувати безпеку, збереження даних та якість реабілітаційного процесу, що відкриває нові можливості для пацієнтів із обмеженим доступом до стаціонарних послуг. Науковий та практичний потенціал VR і AR у медицині значний, реалізація його потребує комплексного та довготривалого підходу.

Джерела фінансування. Власні кошти авторів.

Внесок авторів:

Д. П. Коваль – проведення огляду літератури та написання тексту, формування концепції дослідження;

Д. В. Попович – розробка ідеї та дизайну дослідження.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Національні клінічні протоколи: фізична реабілітація після інсульту / Міністерство охорони здоров'я України. Київ, 2022. URL: <https://moz.gov.ua/protokoli> (дата звернення: 21.09.2025).
2. Luciani B., Pedrocchi A., Tropea P. Use of augmented reality for upper limb rehabilitation: real kinematic feedback with HoloLens 2. *Journal of Neuro Engineering and Rehabilitation*. 2024. Vol. 22, No. 1. P. 1659. URL: <https://arxiv.org/abs/2412.06596> (дата звернення: 21.09.2025).
3. Capriotti A. Virtual reality: a new frontier of physical rehabilitation. *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 10. P. 3080. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/10/3080> (дата звернення: 21.09.2025).
4. Garcia-Sanchez M., Martinez L., Perez H. Early rehabilitation stages using virtual reality after total knee arthroplasty: a systematic review. *Journal of Rehabilitation Research and Development*. 2024. Vol. 61, No. 4. P. 3434. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0197457224003434> (дата звернення: 21.09.2025).

5. Plavoukou T., Li A., Chen S. The effect of virtual and augmented reality on knee osteoarthritis rehabilitation: a systematic review. *Journal of Clinical Medicine*. 2025. Vol. 14, No. 3. P. 1198. URL: <https://www.mdpi.com/2077-0383/14/3/1198> (дата звернення: 21.09.2025).
6. Tunc H., Baltaki M., Shahan S. The effect of virtual reality applications on lower extremity rehabilitation: a systematic review. *Advances in Rehabilitation*. 2024. Vol. 38, No. 2. P. 54828. URL: <https://www.advrehab.org/The-effect-of-virtual-reality-applications-on-treatment-outcomes-in-lower-extremity-rehabilitation-a-systematic-review%2C125%2C54828%2C1%2C1.html> (дата звернення: 21.09.2025).
7. Ding K., Chen L., Li S. Stroke patients' experiences with virtual reality rehabilitation: a systematic review. *Journal of Neuro Engineering and Rehabilitation*. 2025. Vol. 22, No. 1. P. 1641. URL: <https://jneuroengrehab.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12984-025-01641-9> (дата звернення: 21.09.2025).

REFERENCES

1. Ministerstvo okhorony zdorovia Ukrainy. Natsionalni klinichni protokoly: fizychna reabilitatsiia pislia insultu [National clinical protocols: physical rehabilitation after the stroke]. Kyiv, 2022. URL: <https://moz.gov.ua/protokoli> (data zvernennia: 21.09.2025). Ukrainian.

2. Luciani B, Pedrocchi A, Tropea P. Use of augmented reality for upper limb rehabilitation: real kinematic feedback with HoloLens 2. *J NeuroEng Rehabil*. 2024;22(1):1659. Available from: <https://arxiv.org/abs/2412.06596>
3. Capriotti A. Virtual reality: a new frontier of

physical rehabilitation. *Sensors* (Basel). 2025;25(10):3080. Available from: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/10/3080>

4. Garcia-Sanchez M, Martinez L, Perez H. Early rehabilitation stages using virtual reality after total knee arthroplasty: a systematic review. *J Rehabil Res Dev*. 2024;61(4):3434. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0197457224003434>

5. Plavoukou T, Li A, Chen S. The effect of virtual and augmented reality on knee osteoarthritis rehabilitation: a systematic review. *J Clin Med*. 2025;14(3):1198. Available from: <https://www.mdpi.com/2077-0383/14/3/1198>

6. Tunc H, Baltaki M, Shahan S. The effect of virtual reality applications on lower extremity rehabilitation: a systematic review. *Adv Rehabil* (Warsz). 2024;38(2):54828. Available from: <https://www.advrehab.org/The-effect-of-virtual-reality-applications-on-treatment-outcomes-in-lower-extremity-rehabilitation-a-systematic-review%2C125%2C54828%2C1%2C1.html>

7. Ding K, Chen L, Li S. Stroke patients' experiences with virtual reality rehabilitation: a systematic review. *J NeuroEng Rehabil*. 2025;22(1):1641. Available from: <https://jneuroengrehab.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12984-025-01641-9>

D. P. Koval, D. V. Popovych

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

APPLICATION OF ADVANCED AUGMENTED AND VIRTUAL REALITY TECHNOLOGIES IN PHYSICAL REHABILITATION

SUMMARY. The article explores the effectiveness of augmented reality (AR) and virtual reality (VR) technologies in physical rehabilitation. The study's relevance lies in the rapid development of digital medicine and the growing need for innovative approaches to restore patients with neurological and orthopedic disorders.

The aim – the integration of augmented reality (AR) and virtual reality (VR) technologies into rehabilitation practice offers new opportunities for improving treatment outcomes. These tools enhance interactivity, patient motivation, and personalization of therapy through immersive and gamified environments.

Material and Methods. A comprehensive review of systematic reviews, meta-analyses, and randomized controlled trials was conducted using databases such as PubMed, Scopus, and Web of Science, along with leading journals (*Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, *Sensors*, *Journal of Clinical Medicine*). Studies from the last decade were analyzed. Analytical, comparative, and synthesis methods were used to assess clinical efficacy, safety, and organizational aspects of AR/VR interventions.

Results. AR and VR applications were found to stimulate neuroplasticity, enhance motor recovery, improve compensatory abilities, and increase patient engagement through gamification. Proven benefits were observed in post-stroke rehabilitation, Parkinson's disease, orthopedic recovery, chronic pain management, and pediatric therapy. The optimal intervention protocol includes 20–30-minute sessions, three times per week, over 4–8 weeks. The combination of VR with conventional therapy is most effective. Potential limitations include high equipment cost, the need for staff training, and the risk of cybersickness.

Conclusions. AR and VR represent promising innovations in contemporary rehabilitation. Their implementation can significantly improve recovery outcomes and patients' quality of life. Future research should focus on standardizing clinical protocols, developing interdisciplinary training programs, and conducting multicenter trials to confirm long-term efficacy and cost-effectiveness.

KEY WORDS: interactive visual modeling; computer-simulated environment; rehabilitation therapy; neurorehabilitation; gamification; clinical protocols; motor recovery; digital health.

Отримано 10.10.2025

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