

УДК 004.94:007

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.30>**Тарас СКИЦЬКИЙ**

аспірант, Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет»

ORCID: 0009-0007-7411-1861

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОСТОРОВИХ ОБЧИСЛЕНЬ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ У ПРИКЛАДНИХ ГАЛУЗЯХ

Анотація. Стаття присвячена просторовим обчисленням – сучасній технології, яка дозволяє інтегрувати цифрову інформацію та віртуальний контент у фізичний світ, відкриваючи нові можливості для взаємодії та аналізу даних. У статті розглянуто історію розвитку просторових обчислень, починаючи з 1960-х років, коли Айвен Сазерленд представив концепцію «Sketchpad», одного з перших графічних інтерфейсів. Значний прорив у технологіях стався в 1980-х роках завдяки розвитку віртуальної реальності (VR) та пристроїв для занурення користувачів, а у 2010-х роках – завдяки поширенню доповненої реальності (AR) у мобільних пристроях.

Ця стаття визначає основні концепції та термінологію просторових обчислень, зокрема віртуальної, доповненої, змішаної та розширеної реальностей (VR, AR, MR, XR). Розглянуто ключові технології, які дозволяють інтегрувати цифровий контент у фізичне середовище: комп'ютерне бачення, системи відстеження руху та відображення просторових даних. Було визначено ключові пристрої, які допомогли розвитку галузі, зокрема Microsoft HoloLens та Apple Vision Pro.

Окремо проаналізовано застосування просторових обчислень, а саме в галузях освіти, медицини, промисловості, військової сфери та туризму. В освіті просторові обчислення сприяють створенню інтерактивних навчальних середовищ, особливо для дослідження природничих та технічних дисциплін. У медицині ця технологія використовується для імітації хірургічних операцій, лікування фантомного болю в кінцівках та реабілітації пацієнтів. У виробництві та дизайні просторові обчислення допомагають створювати 3D-прототипи, а у військовій справі вони використовуються для навчання солдат і стратегічного планування місій.

У статті також висвітлюються проблеми, пов'язані з використанням просторових обчислень, зокрема високі технічні вимоги, кіберхвороба, обмежене поле зору, надмірне когнітивне навантаження на користувача та висока вартість обладнання.

У висновках підкреслена необхідність подальших досліджень для зниження вартості технологій, розробки ефективних алгоритмів для взаємодії з просторовими середовищами та інтеграції машинного навчання для обробки великих обсягів даних. Просторові обчислення мають потенціал кардинально змінити спосіб взаємодії з цифровим світом, але для їх повноцінної реалізації потрібно подолати технологічні та соціальні бар'єри.

Метою роботи є проаналізувати розвиток сучасних підходів до просторових обчислень, оцінити поточний стан і перспективи розвитку просторових обчислень, особливо їх вплив на різні галузі, такі як освіта, медицина, виробництво та військова справа, а також можливості інтеграції цих технологій для інклюзивного та етичного використання.

Наукова новизна дослідження полягає в комплексному аналізі сучасного стану просторових обчислень, що дозволяє систематизувати етапи їхнього розвитку. Особлива увага приділена можливості інтеграції доповненої, віртуальної та змішаної реальності в освітні, медичні та виробничі процеси.

Ключові слова: просторові обчислення, доповнена реальність, віртуальна реальність, змішана реальність, інтерактивні середовища.

Taras SKYTSKYI. ANALYSIS OF THE CURRENT STATE AND APPLICATIONS OF SPATIAL COMPUTING ACROSS VARIOUS FIELDS

Abstract. The article explores spatial computing, an advanced technology that enables the integration of digital information and virtual content into the physical world, opening new possibilities for interaction and data analysis. The article explores the history of spatial computing development, starting from the 1960s when Ivan Sutherland introduced the concept of Sketchpad, one of the first graphical interfaces. A significant technological breakthrough occurred in the 1980s with the development of virtual reality (VR) and immersive devices, and in the 2010s, with the widespread adoption of augmented reality (AR) in mobile devices.

This article defines the key concepts and terminology of spatial computing, including virtual reality, augmented reality, mixed reality, and extended reality (VR, AR, MR, XR). The study examines core technologies that enable the integration of digital content into the physical environment, such as computer vision, motion tracking systems, and spatial data visualization. Key devices that contributed to the industry's advancement, including Microsoft HoloLens and Apple Vision Pro, are also highlighted.

The application of spatial computing is analyzed separately across various fields, including education, medicine, industry, the military sector, and tourism. In education, spatial computing facilitates the creation of interactive learning environments, particularly for exploring natural sciences and technical disciplines. In medicine, this technology is used for simulating surgical procedures, treating phantom limb pain, and rehabilitating patients. In manufacturing and design, spatial computing aids in creating 3D prototypes, while in the military sector, it is utilized for training soldiers and strategic mission planning.

The article also addresses the challenges associated with spatial computing, such as high technical requirements, cybersickness, limited field of view, significant cognitive load on users, and the high cost of equipment.

The conclusions emphasize the necessity of further research to reduce technology costs, develop effective interaction algorithms for spatial environments, and integrate machine learning for processing large volumes of data. Spatial computing

has the potential to fundamentally transform how people interact with the digital world, but overcoming technological and social barriers is essential for its full implementation.

Key words: spatial computing, augmented reality, virtual reality, mixed reality, interactive environments.

Виклад основного матеріалу. Просторові обчислення почали зароджуватись у 1960-х роках, коли взаємодія між комп'ютерами та користувачами була обмежена командними рядками. Американський науковець Айвен Сазерленд зробив революційний внесок у цю сферу, представивши у 1963 році концепцію «Sketchpad» – один з перших графічних інтерфейсів. Ця комп'ютерна програма дозволяла користувачам малювати та маніпулювати зображеннями на екрані за допомогою світлового пера, тобто безпосередньо, а не шляхом введення командних інструкцій. Хоча «Sketchpad» заклав основу сучасної взаємодії людини та комп'ютера, це був лише початок глибоких технологічних розробок.

У 1980-х роках віртуальна реальність (VR) почала інтенсивно розвиватись завдяки зусиллям Джарона Ланье та його компанії VPL Research. Поява наголовних дисплеїв (HMD) і рукавичок для обробки даних створила новий рівень занурення користувачів, забезпечуючи інтерактивність і відчуття реальності.

На початку 1990-х років термін «доповнена реальність» (AR) почав з'являтися в академічних і технологічних дискусіях, хоча справжній розквіт AR настав лише в 2010-х роках з поширенням смартфонів і планшетів. Наприклад, додаток Pokémon Go у 2016 році продемонстрував потенціал поєднання цифрових елементів із реальним світом, забезпечуючи мільйонам користувачів інтерактивний та захоплюючий досвід. Гра засвідчила й інтерес людей до цієї технології, від моменту виходу додатку його завантажили 500 мільйонів разів лише за перші три місяці.

У 2016 році компанія Microsoft зробила значний прорив, представивши HoloLens – революційний пристрій змішаної реальності (MR). Справжня інновація цієї гарнітури полягала в тому, що вона поєднувала в одному автономному і портативному пристрої кілька передових технологій: набір сенсорів, в тому числі камери глибини та інерційні вимірювальні блоки (IMU) для створення тривимірної карти оточення; голографічний процесор (HPU) для обробки даних з сенсорів у реальному часі; управління жестами, голосом та відстеження погляду. Завдяки HoloLens просторова доповнена реальність знайшла багато практичних застосувань в архітектурі, інженерії та освіті [1].

Новий поштовх для розвитку просторових обчислень відбувся у 2023 році з випуском окулярів Apple Vision Pro, які поєднують у собі можливості AR, VR та MR. Цей пристрій відкрив нові горизонти для інтеграції технологій у повсякденне життя та професійну сферу [2, с. 1–2].

Дорожня карта розвитку просторових обчислень за останні десятиліття показана на Рис. 1.



Рис. 1. Дорожня карта розвитку просторових обчислень

Також необхідно розглянути економічний аспект просторових обчислень. У 2022 році світовий ринок просторових обчислень оцінювався в 102,5 мільярда доларів США, а сукупний річний темп зростання (CAGR) з 2023 по 2030 рік становитиме за прогнозами 20,4%. Ключовими факторами, що сприяють цьому зростанню є величезний попит на технології занурення, інновації в апаратному та програмному забезпеченні, а також широке впровадження в різних галузях. Інвестиції та фінансування технологічних стартапів також сприяють зростанню цього сектору [3].

Концепція та ключові технології. Просторові обчислення – це використання технологій, які інтегрують цифрову інформацію та віртуальний контент у фізичний світ, дозволяючи користувачам взаємодіяти з цифровим контентом у просторовому контексті [4].

Цей термін включає віртуальну реальність (VR) та доповнену реальність (AR), а також пов'язані концепції, такі як змішана реальність (MR) й розширена реальність (XR). Просторові обчислення поєднують реальний та віртуальний світи, дозволяючи користувачам сприймати цифровий контент й взаємодіяти з ним у реальному середовищі. Для створення безшовної інтеграції між цифровими та фізичними елементами використовуються технології комп'ютерного бачення, датчики та системи відстеження рухів й місця розташування користувача та просторове відображення отриманих даних [5, с. 131–132].

Віртуальна реальність (VR) спрямована на створення захоплюючого цифрового досвіду шляхом моделювання віртуального середовища, з яким користувачі можуть взаємодіяти за допомогою спеціальних пристроїв, наприклад, віртуальні гарнітури та окуляри. Ця технологія повністю замінює реальне середовище користувача, поміщаючи його в змодельоване комп'ютерне середовище. Таким чином, користувач відчуває, що перебуває в іншому світі, взаємодіючи з віртуальними об'єктами та просторами [6, с. 257–259].

Доповнена реальність (AR) передбачає накладання цифрової інформації, такої як зображення, відео або 3D-моделі, на реальний світ. Ця технологія покращує сприйняття реальності, додаючи віртуальні елементи, які взаємодіють із фізичним середовищем користувача. Технологію доповненої реальності можна використовувати на таких пристроях, як смартфони, планшети, розумні окуляри або наголовні дисплеї, що дозволяє користувачам сприймати віртуальний контент й взаємодіяти з ним, в той же час залишаючись в реальному світі [7, с. 216].

Змішана реальність (MR) інтегрує цифровий контент у реальний світ, забезпечуючи взаємодію між реальними та віртуальними елементами.

Розширена реальність (XR) – це широкий термін, який включає віртуальну реальність, доповнену реальність та змішану реальність.

На Рис. 2. представлено континуум віртуальності, безперервну шкалу, на якій представлено технології просторових обчислень, від повністю реального середовища (реальності) до повністю віртуального середовища (віртуальності). Ця концептуальна модель була вперше представлена Полом Мілграмом у 1994 році [8].

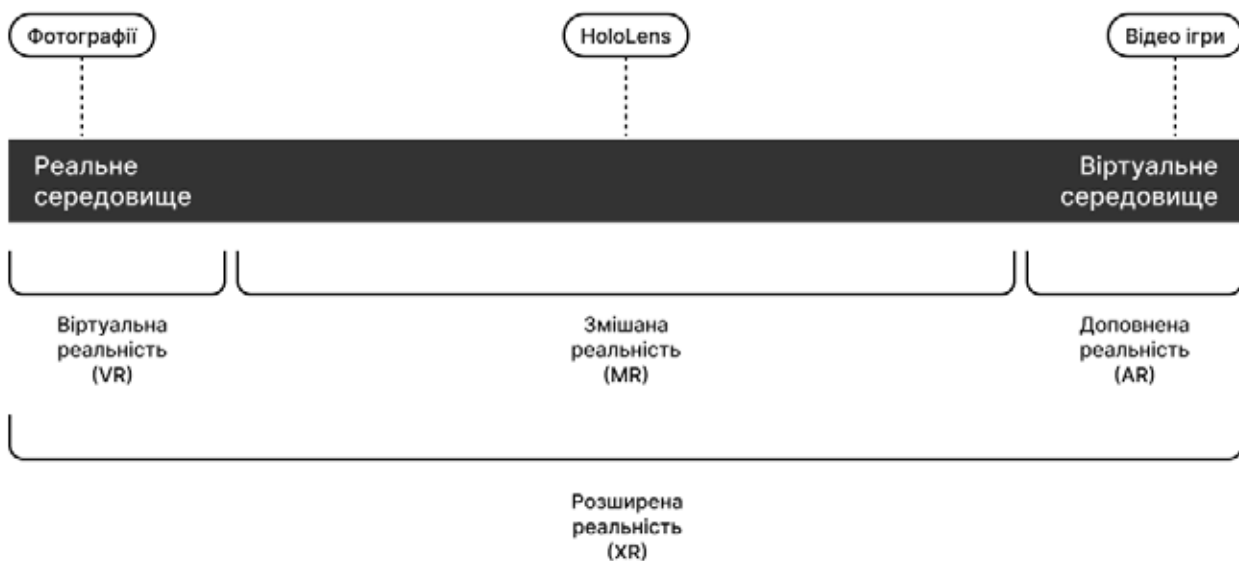


Рис. 2. Континуум віртуальності

Технології розширеної реальності, включаючи AR, VR і MR, відіграють життєво важливу роль у розвитку та просуванні просторових обчислень. Доповнена реальність накладає цифрову інформацію на реальне середовище, збагачуючи просторове розуміння. У контексті просторових обчислень доповнена реальність використовується для надання контекстної інформації про фізичні об'єкти чи місця, покращуючи тим самим ефект занурення. Доповнена реальність також полегшує просторову взаємодію, дозволяючи користувачам взаємодіяти з цифровими об'єктами в реальному світі за допомогою розпізнавання жестів, безконтактної взаємодії та просторово-орієнтованих інтерфейсів. Це особливо корисно для навігаційних програм у просторових обчисленнях, надаючи візуальні підказки та вказівки, накладені на реальний світ, спрощуючи складні навігаційні завдання [9].

Просторові обчислення використовують віртуальну реальність для різноманітних цілей, таких як навчальні симуляції, віртуальні тури (HoloTour – додаток для HoloLens, який переносить користувачів

у відомі місця світу у форматі 360-градусних віртуальних турів) та просторовий дизайн (IKEA Kreativ – додаток на основі штучного інтелекту, який дозволяє користувачам розставляти товари IKEA у власних помешканнях, використовуючи VR та просторові обчислення). Віртуальна реальність дає користувачам відчуття присутності, стаючи потужним інструментом для створення захоплюючих просторових вражень. Крім того, віртуальна реальність підтримує віртуальну співпрацю, дозволяючи географічно віддаленим людям працювати разом у спільному віртуальному просторі, що особливо корисно в таких галузях, як архітектура, інженерія та дизайн. Здатність віртуальної реальності візуалізовувати просторові дані та 3D-моделі покращує розуміння та аналіз просторової інформації.

Змішана реальність долає розрив між фізичним і цифровим світами, плавно поєднуючи обидва. У просторових обчисленнях змішана реальність використовується для поєднання цифрового контенту з реальним середовищем, створюючи захоплююче мультимедійне середовище. Пристрої змішаної реальності забезпечують взаємодію без використання рук, використовуючи управління жестами або ж поглядом, що полегшує взаємодію з просторовим контентом без потреби у фізичних контролерах.

Просторові обчислення дозволяють досліджувати цифровий контент у спосіб, який сумісний із когнітивними можливостями людини. Незалежно від того, чи йдеться про сторітеллінг, візуалізацію даних, математичні концепції чи надзвичайно великі або ж малі об'єкти, як галактики чи молекулярні структури, просторові обчислення створюють середовище, сприятливе для природної взаємодії. Цей «новий натуралізм» відповідає фізичним очікуванням людини, виходячи за межі сприйняття та фізичних можливостей.

3. Сфери застосування:

Освіта. Просторові обчислення відкривають нові горизонти для навчання. Наприклад, студенти можуть вивчати анатомію за допомогою 3D-моделей або здійснювати віртуальні екскурсії історичними місцями. Вплив тривимірного середовища сприяє реалістичному розумінню складних тем, особливо в галузях науки, технології, інженерії та математики (STEM), де просторові здібності є дуже важливими [10, 11]. Так, на уроці фізики студент може перевірити, чи працюють його формули побудови мосту в змодельованому середовищі.

Просторові обчислення вирізняються здатністю персоналізувати навчальний контент. Завдяки штучному інтелекту вчителі можуть планувати уроки на основі бажаного темпу та стилю навчання кожного учня. Крім того, досягнення в доповненій реальності, такі як Apple Vision Pro, можуть демократизувати освіту, розширюючи можливості навчання у віддалених місцях чи людей інвалідністю [12].

Медицина. Просторові обчислення пропонують нові методи лікування та навчання для медичних працівників. Наприклад, технологія віртуальної реальності використовується для моделювання хірургічних операцій, а доповнена реальність дозволяє візуалізувати внутрішні органи в реальному часі.

Відчуття присутності, досягнуте за допомогою віртуальної й доповненої реальності, може допомогти в експозиційній терапії деяких типів психологічних проблем, таких як фобії павуків чи тарганів [13, 14]. Інші застосування включають лікування фантомного болю в кінцівках за допомогою доповненої реальності [15], накладання голографічного зображення для підготовки до операцій [16] та реабілітацію рук після інсульту [17].

Просторові обчислення дозволяють хірургам використовувати голографічне зображення людського тіла, щоб відпрацьовувати хірургічні операції перед тим, як виконувати їх на пацієнтах, що підвищує точність і безпеку складних процедур. Згідно дослідження Федеральної політехнічної школи Лозанни (EPFL) VR-терапія покращує стан пацієнтів з паралічем, що страждають фантомними болями. Учасники відчувають ілюзію дотику до їхніх паралізованих ніг, що сприяє зниженню фантомного болю [18]. Зараз таку практику в Україні використовують в ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМНУ» для реабілітації поранених військових [19].

Виробництво. У виробничій галузі доповнена реальність допомагає працівникам виконувати складні завдання, накладаючи віртуальні інструкції на реальне виробниче середовище. Ці посібники частково можуть бути замінені системами доповненої реальності, які відображають ті самі інструкції та додають прив'язані до місцевості вказівки. Такі програми були розроблені для аерокосмічної [20] та харчової [21] галузей.

Інженери та дизайнери використовують змішану реальність для створення 3D-прототипів, що дозволяє значно зменшити вартість виготовлення фізичних моделей [22].

Військова справа. Система доповненої реальності Integrated Visual Augmentation System (IVAS), – розробка компанії Microsoft, що вдосконалила цивільні окуляри доповненої реальності HoloLens для військових цілей, – використовується для підготовки солдатів і планування місій для Збройних сил США. У 2024 році Microsoft інтегрувала в цю систему штучний інтелект, що дозволило автономно виявляти загрози та збільшити тактичну перевагу солдатів на полі бою [23]. Ізраїльські військові, зокрема,

використовували віртуальну реальність для моделювання бойових ситуацій, що значно підвищило ефективність їхніх дій [24].

Українська компанія Logics7 розробляє VR-симулятори, які дозволяють військовослужбовцям відпрацьовувати навички володіння ПЗРК Stinger, Piorun, «Ігла». Такі тренування вже пройшли понад 45 000 військових, серед яких ТрО, морська піхота, ГУР і ССО. Це дозволяє економити боєприпаси і зменшує зношування озброєння [25].

Туризм. Просторові обчислення використовуються для створення віртуальних турів або ж накладання гідів в доповненій реальності, які можуть проводити гостей готелем, надавати індивідуальні рекомендації й навіть допомагати візуалізувати план номерів [26].

Об'єкти культурної спадщини привертають до себе додаткову увагу завдяки технологіям, оскільки туристи мають змогу у доповненій реальності накладати зниклі пам'ятки або віртуальних мешканців відповідного періоду [27; 28]. Аналогічно, доповнену реальність використовують для розфарбовування археологічних артефактів [29]. Завдяки тактильному інтерфейсу ці артефакти також можна відчутти. Ця технологія використовувалася в музеях для створення ілюзії дотику до безцінних об'єктів, фізичний контакт з якими є неприпустимим [30].

Висновки. Аналіз поточного стану та розвитку просторових обчислень показав, що ця технологія є однією з найбільш інноваційних напрямків сучасної науки, що відкриває значні можливості для розвитку багатьох галузей. Просторові обчислення стали важливим інструментом для створення інтерактивного досвіду в медицині, освіті, виробництві, військовій справі та інших сферах. Вони забезпечують більшу точність, ефективність та персоналізацію процесів, створюючи нові підходи до вирішення складних проблем. Проте застосування просторових обчислень зіштовхується з певними викликами. Серед основних проблем виділяють:

- Обмежене поле зору, у якому можна відображати доповнену чи віртуальну реальність, та обмежений час роботи акумулятора є одними з головних технічних обмежень сучасних поколінь гарнітур. Сама конструкція гарнітури може бути причиною поганого досвіду користувача через додаткову вагу на голові користувача. Покращення ергономіки та фізичного дизайну пристрою може відігравати вирішальну роль у полегшенні сприйняття доповненої та віртуальної реальності.
- Кіберхвороба – сукупність симптомів, які відчуває користувач під час або після перебування в імєрсивному середовищі. Деякі користувачі відчувають зорове напруження або дезорієнтацію під час використання AR/VR пристроїв. Це фізіологічна реакція на незвичний сенсорний стимул, схожий на морську хворобу руху. Такі симптоми можуть обмежувати тривалість та частоту використання технологій.
- Величезний обсяг даних та інформації, створений цими системами, а також складні інтерфейси, відсутність просторових орієнтирів і сенсорне перенасичення можуть перевантажувати користувачів інформацією, внаслідок чого вони можуть відчувати розгубленість та мати труднощі у взаємодії з віртуальним середовищем.
- Висока вартість сучасних пристроїв для відтворення просторових обчислень може обмежити застосування цієї технології у всіх вищезгаданих галузях. Наприклад, два найсучасніших пристрої – HoloLens 2 від Microsoft і Apple Vision Pro – коштують близько 3500 доларів США кожен.
- Довговічність пристроїв для VR/AR. Розробникам шоломів потрібно буде посилити надійність адаптивних та погодостійких матеріалів для використання в екстремальних умовах експлуатації.
- Деякі пристрої можуть бути фізично незручними для людей з інвалідністю, а також можуть не враховувати сенсорні або когнітивні особливості певних користувачів, що обмежує їх доступ до цифрового середовища.

Майбутні дослідження повинні зосередитися на розробці більш доступного апаратного забезпечення, вдосконаленні алгоритмів для зменшення когнітивного навантаження та інтеграції машинного навчання для ефективної обробки великих обсягів даних. Також важливо розробити етичні стандарти для використання просторових обчислень у різних галузях.

Отже, просторові обчислення – це технологія, яка має потенціал трансформувати поточні методи взаємодії з цифровим та фізичним середовищем. Однак для повного впровадження цієї технології необхідно подолати існуючі проблеми та забезпечити етичне, доступне та безпечне впровадження просторових обчислень на практиці.

Список використаних джерел:

1. Evolution of spatial computing. URL: <https://www.travancoreanalytics.com/evolution-of-spatial-computing/> (date of access: 20.01.2025).
2. Waisberg E., Ong J., Masalkhi M., Zaman N., Sarker P., Lee A. G., Tavakkoli A. Apple vision pro and why extended reality will revolutionize the future of medicine. *Irish Journal of Medical Science*, 2024. P. 531–532. URL: <https://doi.org/10.1007/s11845-023-03437-z> (date of access: 20.01.2025).

3. Spatial Computing Market Report. URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/spatial-computing-market-report> (date of access: 20.01.2025).
4. Yenduri G., Ramalingam M., Maddikunta P.K., Gadekallu T.R., Jhaveri R.H., Bandi A., Chen J., Wang W., Shirawalmath A.A., Ravishankar R., Wang W. Spatial Computing: Concept, Applications, Challenges and Future Directions. *arXiv preprint*. 2024. URL: <https://arxiv.org/abs/2402.07912> (date of access: 20.01.2025).
5. Mohamed K. S. Deep learning for spatial computing: Augmented reality and metaverse “the digital universe”. *Deep Learning-Powered Technologies: Autonomous Driving, Artificial Intelligence of Things (AIoT), Augmented Reality, 5G Communications and Beyond*. Springer, 2023. P. 131–150. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-35737-4_4 (date of access: 20.01.2025).
6. Scavarelli A., Arya A., Teather R. J. Virtual reality and augmented reality in social learning spaces: a literature review. *Virtual reality*. 2020. URL: <https://doi.org/10.1007/s10055-020-00444-8> (date of access: 20.01.2025).
7. Xiong J., Hsiang E.-L., He Z., Zhan T., Wu S.-T. Augmented reality and virtual reality displays: emerging technologies and future perspectives. *Light: Science & Applications*. 2021. Vol. 10, No 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41377-021-00658-8> (date of access: 20.01.2025).
8. Milgram P., Takemura H., Utsumi A., Kishino F. Augmented Reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum. *Proceedings of SPIE 2351. Telemanipulator and Telepresence Technologies*. 1994. URL: <https://doi.org/10.1117/12.197321> (date of access: 20.01.2025).
9. Templin T., Popielarczyk D., Gryszko M. Using augmented and virtual reality (AR/VR) to support safe navigation on inland and coastal water zones. *Remote Sensing*. Vol. 14, No 6. 1520. URL: <https://doi.org/10.3390/rs14061520> (date of access: 20.01.2025).
10. The Promise of Immersive Learning: Augmented and Virtual Reality’s Potential in Education. *Information Technology and Innovation Foundation (ITIF)*. URL: <https://itif.org/publications/2021/08/30/promise-immersive-learning-augmented-and-virtual-reality-potential/> (date of access: 20.01.2025).
11. How Augmented Reality Is Changing the Way We Learn. *The New York Times*. URL: <https://www.nytimes.com/spotlight/augmented-reality> (date of access: 20.01.2025).
12. The Potential of Augmented Reality for Education. *eLearning Industry*. URL: <https://elearningindustry.com/augmented-reality-in-education-staggering-insight-into-future> (date of access: 20.01.2025).
13. Botella C. M., Juan M. C., Baños R. M., Alcañiz M., Guillén V., Rey B. Mixing realities? An application of augmented reality for the treatment of cockroach phobia. *CyberPsychology & Behavior*. 2005. Vol. 8, No 2. P. 162–171. URL: <https://doi.org/10.1089/cpb.2005.8.162> (date of access: 20.01.2025).
14. Juan M. C., Alcaniz M., Monserrat C., Botella C., Banos R. M., Guerrero B. Using augmented reality to treat phobias. *IEEE Computer Graphics and Applications*. 2005. Vol. 25, No 6. P. 31–37. URL: <https://doi.org/10.1109/mcg.2005.143> (date of access: 20.01.2025).
15. Carrino F., Rizzotti D., Gheorghe C., Kabasu Bakajika P., Francescotti-Paquier F., Mugellini E. Augmented reality treatment for phantom limb pain. *Virtual, Augmented and Mixed Reality. Applications of Virtual and Augmented Reality*. Cham, 2014. P. 248–257. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-07464-1_23 (date of access: 20.01.2025).
16. Fuchs, H., Livingston, M.A., Raskar, R., Colucci, D., Keller, K., State, A., Crawford, J.R., Rademacher, P., Drake, S.H., & Meyer, A.A. Augmented reality visualization for laparoscopic surgery. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI’98*. Berlin, Heidelberg, 1998. P. 934–943. URL: <https://doi.org/10.1007/bfb0056282> (date of access: 20.01.2025).
17. Mousavi Hondori H., Khademi M., Dodakian L., Cramer S. C., Lopes C. V. A spatial augmented reality rehab system for post-stroke hand rehabilitation. *Studies in Health Technology and Informatics*. 2013. Vol. 184. P. 279–285. URL: <http://dx.doi.org/10.3233/978-1-61499-209-7-279> (date of access: 20.01.2025).
18. Virtual Reality Reduces Phantom Pain in Paraplegics. *EPFL*. URL: <https://actu.epfl.ch/news/virtual-reality-reduces-phantom-pain-in-parapleg-5/> (date of access: 20.01.2025).
19. VR-терапія для реабілітації. *Рубрика*. URL: <https://rubryka.com/article/vr-terapiya-dlya-reabilitatsiyi/> (дата звернення: 20.01.2025).
20. Serván J., Mas F., Menéndez J. L., Ríos J. Assembly work instruction deployment using augmented reality. *Key Engineering Materials*. 2012. Vol. 502. P. 25–30. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.502.25> (date of access: 20.01.2025).
21. Re G. M., Bordegoni M. An augmented reality framework for supporting and monitoring operators during maintenance tasks. *Virtual, Augmented and Mixed Reality. Applications of Virtual and Augmented Reality*. Cham, 2014. P. 443–454. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-07464-1_41 (date of access: 20.01.2025).
22. Spatial Computing: Revolutionizing Industries with AI, AR, and VR Integration. *E-SPIN Group*. URL: <https://www.e-spincorp.com/spatial-computing-revolutionizing-industries-ai-ar-vr-integration/> (date of access: 20.01.2025).
23. Integration of IVAS, Anduril, and Microsoft Lattice for the Army. *DefenseScoop*. URL: <https://defensescoop.com/2024/09/19/ivas-anduril-microsoft-lattice-integration-army/> (date of access: 20.01.2025).
24. With Virtual Reality, Israeli Soldiers Train in Simulated Terror Tunnels. *The Times of Israel*. URL: <https://www.timesofisrael.com/with-virtual-reality-israeli-soldiers-train-in-simulated-terror-tunnels/> (date of access: 20.01.2025).
25. Українська компанія навчила 45 000 військових збивати “Шахеди”: як працюють VR і лазерні тренажери. *Liga.Tech*. URL: <https://tech.liga.net/ua/technology/article/ukrainska-kompaniia-navchyla-45-000-viiskovykh-zbyvaty-shakhedy-yak-pratsuiut-vr-i-lazerni-trenazhery> (дата звернення: 20.01.2025).
26. Spatial Computing: The New Frontier in Hospitality. *HospitalityNet*. URL: <https://www.hospitalitynet.org/opinion/4120267.html> (date of access: 20.01.2025).

27. Noh Z., Sunar M. S., Pan Z. A review on augmented reality for virtual heritage system. *Learning by Playing. Game-based Education System Design and Development*. 2009. P. 50–61. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-642-03364-3_7 (date of access: 20.01.2025).
28. Vlahakis V., Karigiannis J., Tsotros M., Gounaris M., Almeida L., Stricker D., Gleue T., Christou I. T., Carlucci R., Ioannidis N. Archeoguide: first results of an augmented reality, mobile computing system in cultural heritage sites. *Proceedings of the 2001 Conference on Virtual Reality, Archeology, and Cultural Heritage*. Glyfada, Greece: ACM, 2001. P. 131–140.
29. Ridel B. Techniques d'interaction, affichage personnalisé et reconstruction de surfaces pour la réalité augmentée spatiale : Dissertation de doctorat. Bordeaux, 2016. P. 44–46. URL: <http://www.theses.fr/2016BORD0149/document> (date d'accès: 20.01.2025).
30. Dima M., Hurcombe L., Wright M. Touching the past: haptic augmented reality for museum artefacts. *Virtual, Augmented and Mixed Reality. Applications of Virtual and Augmented Reality*. Cham, 2014. P. 3–14. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-07464-1_1 (date of access: 20.01.2025).