Процак Тетяна Василівна, кандидат медичних наук, доцент кафедри анатомії людини ім. М. Г. Туркевича Буковинського державного медичного університету, м. Чернівці, Україна, https://orcid.org/0000-0002-9620-3667

Забродський Ігор Сергійович, студент III курсу Медичного факультету Буковинського державного медичного університету, м. Чернівці, Україна, https://orcid.org/0009-0005-3576-6828

Protsak Tetiana Vasylivna, Candidate of Medical Sciences, Associate Professor of the Mykola Turkevich Human anatomy department Bukovinian state medical university, Chernivtsi, Ukraine, https://orcid.org/0000-0002-9620-3667

Zabrodskyi Ihor Serhiiovych, 3rd year student of Medical faculty of Bukovinian state medical university, Chernivtsi, Ukraine, https://orcid.org/0009-0005-3576-6828

ЦИФРОВІ ТЕХНОЛОГІЇ У ВИВЧЕННІ АНАТОМІЇ ГОЛОВНОГО МОЗКУ: ПЕРСПЕКТИВИ СИМУЛЯЦІЙНОГО НАВЧАННЯ

DIGITAL TECHNOLOGIES IN THE STUDY OF BRAIN ANATOMY: PERSPECTIVES OF SIMULATION-BASED LEARNING

Анотація

У статті розглянуто сучасні підходи до використання цифрових технологій у вивченні анатомії головного мозку. Показано, що традиційні методи, засновані на демонстрації анатомічних препаратів, не завжди забезпечують повне розуміння просторових взаємовідношень мозкових структур. Використання цифрових інструментів — віртуальної (VR) та доповненої реальності (AR), інтерактивних 3D-моделей, симуляційних платформ і технологій 3D-друку — відкриває нові можливості для глибшого

засвоєння матеріалу, розвитку просторового мислення та формування анатомічної уяви студентів.

Проаналізовано досвід провідних університетів світу — Harvard Medical School, Stanford University School of Medicine, University of Oxford, King's College London та National and Kapodistrian University of Athens — де цифрові симуляції, VR-технології та система Anatomage Table активно інтегровані в курси нейроанатомії. Такі інструменти забезпечують поєднання теоретичних знань із практичними навичками, підвищують ефективність навчання й мотивацію студентів.

В Україні процес цифровізації медичної освіти активно розвивається. У Національному медичному університеті імені О.О. Богомольця функціонує симуляційна лабораторія з 3D-моделями, у Львівському національному медичному університеті імені Данила Галицького впроваджуються AR-технології, у Харківському національному медичному університеті використовуються мультимедійні платформи для моделювання нейроанатомічних процесів, а у Тернопільському національному медичному університеті імені І.Я. Горбачевського діє навчально-практичний центр симуляційних технологій.

Зазначено, що поєднання цифрових і традиційних методів навчання є найефективнішим шляхом підготовки студентів до клінічної практики. Водночас підкреслено необхідність технічного забезпечення, підготовки викладачів і методичного супроводу. Узагальнено, що цифрові технології у вивченні анатомії головного мозку підвищують якість освіти та сприяють формуванню інноваційного мислення майбутніх лікарів.

Ключові слова: анатомія головного мозку, цифрові технології, симуляційне навчання, VR, 3D-моделювання, медична освіта.

Abstract

The article examines modern approaches to the use of digital technologies in studying the anatomy of the human brain. It is shown that traditional teaching methods based on the demonstration of anatomical specimens do not always provide a complete understanding of the spatial relationships of brain structures. The implementation of digital tools — virtual (VR) and augmented reality (AR), interactive 3D models, simulation platforms, and 3D printing technologies — opens new possibilities for deeper learning, development of spatial thinking, and formation of anatomical imagination among medical students.

The experience of leading universities worldwide — Harvard Medical School, Stanford University School of Medicine, the University of Oxford, King's College London, and the National and Kapodistrian University of Athens — has been analyzed. These institutions actively integrate digital simulations, VR technologies, and the Anatomage Table system into neuroanatomy courses. Such tools combine theoretical knowledge with practical skills, enhancing learning efficiency and student motivation.

In Ukraine, the digitalization of medical education is actively evolving. At Bogomolets National Medical University, a modern simulation laboratory with 3D models has been established; Danylo Halytsky Lviv National Medical University implements AR technologies for brain anatomy education; Kharkiv National Medical University uses multimedia platforms for interactive neuroanatomical modeling; and I. Horbachevsky Ternopil National Medical University operates a simulation training center that combines traditional and digital methods.

It is emphasized that combining digital and traditional teaching approaches represents the most effective strategy for preparing students for clinical practice. At the same time, successful implementation requires proper technical infrastructure, instructor training, and methodological support. Overall, the integration of digital technologies in brain anatomy education improves the quality

of medical training and fosters the development of innovative and practice-oriented thinking among future physicians.

Keywords: brain anatomy, digital technologies, simulation-based learning, VR, 3D modeling, medical education.

Постановка проблеми. Традиційні методи вивчення анатомії головного мозку, що базуються на демонстрації анатомічних препаратів та ілюстративних матеріалів, не завжди забезпечують достатню візуалізацію просторових взаємовідношень його структур. Складна тривимірна організація мозку потребує інноваційних підходів до навчання, які б поєднували наочність, інтерактивність і можливість багаторазового відтворення навчального матеріалу. У цьому контексті цифрові технології та симуляційні платформи відкривають нові можливості для глибшого розуміння анатомії головного мозку, проте питання їх ефективності, доступності та інтеграції в освітній процес потребують подальшого наукового аналізу [1-3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження свідчать, що впровадження цифрових технологій у вивчення анатомії головного мозку суттєво розширює можливості традиційного навчання. Використання віртуальної (VR) та доповненої реальності (AR), інтерактивних 3D-моделей і симуляційних платформ допомагає студентам глибше розуміти просторову організацію мозкових структур, підвищує рівень засвоєння матеріалу та розвиває анатомічне мислення [1-4].

Низка досліджень підтверджує, що застосування VR і AR забезпечує кращі результати у тестуванні та формуванні просторової уяви, порівняно з традиційними методами. Особливо ефективними виявилися інтерактивні 3D-моделі й 3D-друковані зразки мозку, які забезпечують високу наочність і

мотивацію студентів, виступаючи доступною альтернативою натуральним препаратам [5-6].

Водночас ефективність цифрових технологій залежить від їхньої інтеграції у навчальні програми та відповідної підготовки педагогічних кадрів. Найкращі результати демонструють гібридні підходи, що поєднують традиційні методи з цифровими засобами. Серед обмежень відзначають високу вартість обладнання, недостатню технічну підготовку викладачів і потребу у стандартизації критеріїв оцінювання [7-8].

Мета. На основі аналізу сучасної наукової літератури узагальнити дані щодо використання цифрових технологій у вивченні анатомії головного мозку, визначити їх роль у формуванні просторового мислення студентів-медиків та оцінити перспективи впровадження симуляційного навчання як інноваційного інструменту медичної освіти.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розвиток цифрових технологій створює нові можливості для модернізації процесу вивчення анатомії головного мозку, який традиційно вважається одним із найскладніших розділів анатомії людини. У центрі уваги сучасних освітніх підходів — використання інноваційних інструментів, що поєднують інтерактивність, наочність та можливість індивідуалізації навчання. Застосування віртуальної (VR) та доповненої реальності (AR) дозволяє студентам досліджувати внутрішню будову мозку у тривимірному просторі, змінювати масштаб, розглядати окремі структури та взаємозв’язки між ними, що значно полегшує засвоєння складного матеріалу [9].

Одним із найефективніших напрямів симуляційного навчання є створення інтерактивних віртуальних моделей головного мозку, які відтворюють анатомічні структури з високою точністю. Такі моделі дають змогу формувати просторове мислення, тренувати навички розпізнавання анатомічних структур і сприяють переходу від теоретичних знань до

практичних навичок. Крім того, вони можуть бути інтегровані з нейровізуалізаційними даними (МРТ, КТ), що забезпечує тісний зв'язок між фундаментальними дисциплінами та клінічною підготовкою майбутніх лікарів [10].

Не менш важливим аспектом сучасного симуляційного навчання є використання технології 3D-друку, яка відкрила нові можливості для створення фізичних моделей головного мозку. Такі моделі дозволяють відтворювати анатомічні структури у натуральному масштабі з високою точністю, що забезпечує більш реалістичне уявлення про морфологічні особливості мозкових відділів. Завдяки використанню полімерних матеріалів із різним ступенем жорсткості стає можливим не лише відтворення зовнішньої форми структур, а й моделювання щільності тканин, що підвищує тактильний компонент навчання.

Поєднання тривимірно надрукованих моделей із цифровими симуляціями створює інтегроване навчальне середовище, у якому студенти можуть послідовно переходити від віртуальної візуалізації до фізичного маніпулювання моделлю. Такий підхід дозволяє краще зрозуміти просторові взаємовідношення між структурами, що особливо важливо під час вивчення базальних ядер, провідних шляхів, стовбурових утворень і системи шлуночків головного мозку. У порівнянні з традиційними анатомічними препаратами, 3D-моделі є більш доступними, не потребують спеціальних умов зберігання та можуть бути багаторазово використані для навчальних демонстрацій [11].

Крім того, використання доповненої (AR) та віртуальної реальності (VR) у поєднанні з фізичними 3D-моделями забезпечує ефект занурення у тривимірний простір мозкових структур. Студенти мають можливість накладати цифрові шари — судинну систему, провідні шляхи, зони кори — на фізичну модель, що сприяє формуванню асоціативного мислення та

просторової анатомічної пам’яті. Подібна інтеграція технологій відкриває перспективи для інтерактивного навчання, коли користувач може в реальному часі змінювати масштаб, обертати модель, розглядати перетини або вивчати анатомічні взаємозв’язки у різних площинах.

Досвід розвинутих країн свідчить про активне впровадження цифрових технологій у процес медичної освіти. Зокрема, у США такі провідні університети, як Stanford University School of Medicine та Indiana University Health, активно використовують віртуальні анатомічні лабораторії, зокрема платформи Complete Anatomy та 3D Organon, які дозволяють студентам досліджувати мозкові структури у форматі інтерактивного 3D-середовища [12-13]. У Великій Британії (University of Oxford, King’s College London) цифрові симуляції та VR-технології інтегровані в курси нейроанатомії, що забезпечує поєднання теоретичних знань із практичними навичками [14]. У Греції (National and Kapodistrian University of Athens) застосовується система Anatomage Table — інтерактивний стіл для віртуального препарування, який дозволяє детально досліджувати будову головного мозку на основі високоякісних 3D-візуалізацій [15].

В Україні цифровізація медичної освіти поступово набирає обертів. У Національному медичному університеті імені О.О. Богомольця створено сучасну симуляційну лабораторію, де використовуються 3D-моделі анатомічних структур і віртуальні тренажери. Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького впроваджує технології доповненої реальності для вивчення анатомії мозку, а у Харківському національному медичному університеті використовуються мультимедійні платформи для інтерактивного моделювання нейроанатомічних процесів. Також у Тернопільському національному медичному університеті імені І.Я. Горбачевського функціонує навчально-практичний центр симуляційних

технологій, де поєднано традиційні методи з цифровими симуляціями у вивченні анатомії [16-17].

Таким чином, інтеграція цифрових інструментів у медичну освіту як у провідних країнах світу, так і в Україні – демонструє тенденцію до переходу від пасивних форм навчання до інтерактивного, практично орієнтованого освітнього процесу, що підвищує ефективність засвоєння складних анатомічних тем, зокрема анатомії головного мозку.

Огляд літератури показав, що симуляційне навчання сприяє підвищенню мотивації студентів, активізує самостійне опрацювання матеріалу та покращує якість знань. Застосування цифрових платформ забезпечує можливість багаторазового повторення матеріалу без обмеження в часі та ресурсах, що особливо актуально в умовах скорочення доступу до натуральних анатомічних препаратів. Разом із тим, впровадження таких технологій потребує належного технічного забезпечення, підготовки викладачів і розробки методичних рекомендацій щодо їхнього використання в навчальному процесі [11, 18].

Отже, цифрові технології та симуляційне навчання відкривають новий етап у викладанні анатомії головного мозку. Вони поєднують точність наукового знання з сучасними педагогічними підходами, забезпечуючи ефективніше засвоєння матеріалу та формування практично орієнтованих компетентностей майбутніх медиків.

Висновки

Анатомія головного мозку — це не лише складна наука про структури, а й подорож у глибини того, що робить людину людиною. Сучасні цифрові технології відкривають двері до цього світу під новим кутом — крізь світло пікселів, що перетворюються на образи нервових шляхів, звивин і борозен. Віртуальні моделі та симуляційне навчання дозволяють не просто бачити – а розуміти, не просто запам’ятовувати – а відчувати логіку будови мозку.

Для студента-медика це — можливість поєднати традиційну анатомічну школу з інноваційним мисленням, навчитися працювати не лише руками, а й розумом, який уміє вчитись через досвід, технологію й натхнення. Тож цифрові технології у вивченні анатомії головного мозку — це не заміна старого, а його продовження, новий шлях до пізнання, де кожен клік миші веде до глибшого розуміння та поваги до найскладнішої системи у всесвіті — людського мозку.

Список використаної літератури

1. Процак Т.В., Забродський І.С. Значення 3D-моделювання у вивченні анатомії стовбура мозку. Modern Science, Economy and Digital Innovation: Collection of Scientific Papers with Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference. International Scientific Unity. May 7-9, 2025. Bucharest, Romania. 279-283 p.

2. Процак Т. В., Забродський І. С., Гуцал В. О. Мобільні додатки як допоміжний інструмент у вивченні анатомії людини // Science, technology and global challenges. Proceedings of the 1st International scientific and practical conference. CPN Publishing Group. Tokyo, Japan. 2025. Pp. 55-65

3. Процак Т.В., Забродський І.С., Ясінський М.М. Психологічна адаптація студентів до занять у секційній залі: педагогічні та етичні Аспекти. «Перспективи та інновації науки (Серія «Педагогіка», Серія «Психологія», Серія «Медицина»)»: журнал. 2025. № 10(56) 2025. С. 2711-2727. https://doi.org/10.52058/2786-4952-2025-10(56)-2711-2727

4. Процак Т.В., Забродський І.С., Філіпчук А.Д., Гуцал В.О. Формування практичних навичок з анатомії людини за допомогою симуляційних технологій // International experience in scientific research. Proceedings of the 3rd International scientific and practical conference. BoScience Publisher. Chicago, USA. 2025. Pp. 76-83

5. Aridan, N., Bernstein-Eliav, M., Gamzo, D., Schmeidler, M., Tik, N., & Tavor, I. (2024). Neuroanatomy in virtual reality: Development and pedagogical evaluation of photogrammetry-based 3D brain models. Anatomical sciences education, 17(2), 239–248. https://doi.org/10.1002/ase.2359

6. Cercenelli, L., De Stefano, A., Billi, A. M., Ruggeri, A., Marcelli, E., Marchetti, C., Manzoli, L., Ratti, S., & Badiali, G. (2022). AEducaAR, Anatomical Education in Augmented Reality: A Pilot Experience of an Innovative Educational Tool Combining AR Technology and 3D Printing. International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(3), 1024. https://doi.org/10.3390/ijerph19031024

7. Patra, A., Asghar, A., Chaudhary, P., & Ravi, K. S. (2022). Integration of innovative educational technologies in anatomy teaching: new normal in anatomy education. Surgical and radiologic anatomy : SRA, 44(1), 25–32. https://doi.org/10.1007/s00276-021-02868-6

8. Owolabi, J.O., Gardner, K., Agboola, R. et al. Use of simulation for teaching biomedical sciences to undergraduate medical students- a scoping review. BMC Med Educ 25, 1259 (2025). https://doi.org/10.1186/s12909-025-07819-y

9. Gurses, M. E., Gökalp, E., Gecici, N. N., Gungor, A., Berker, M., Ivan, M. E., Komotar, R. J., Cohen-Gadol, A. A., & Türe, U. (2024). Creating a neuroanatomy education model with augmented reality and virtual reality simulations of white matter tracts. Journal of neurosurgery, 141(3), 865–874. https://doi.org/10.3171/2024.2.JNS2486

10. Ye, Z., Dun, A., Jiang, H. et al. The role of 3D printed models in the teaching of human anatomy: a systematic review and meta-analysis. BMC Med Educ 20, 335 (2020). https://doi.org/10.1186/s12909-020-02242-x

11. Hernández-Aceituno, J., Arnay, R., Hernández, G., Ezama, L., & Janssen, N. (2022). Teaching the Virtual Brain. Journal of digital imaging, 35(6), 1599–1610. https://doi.org/10.1007/s10278-022-00652-5

12. Lane Medical Library, Stanford University School of Medicine. (2023, September 1). Complete Anatomy [Blog post]. https://laneblog.stanford.edu/2023/09/01/complete-anatomy/

13. Lilly J. (2022). 3D Organon VR Anatomy. Journal of the Medical Library Association : JMLA, 110(2), 276–278. https://doi.org/10.5195/jmla.2022.1341

14. Department of Physiology, Anatomy and Genetics (DPAG), University of Oxford. (2024). Medical students at Oxford explore human anatomy using virtual reality (VR). Retrieved November 4, 2025, from https://www.ctl.ox.ac.uk/testing-a-virtual-reality-vr-application

15. Kavvadia, E. M., Katsoula, I., Angelis, S., & Filippou, D. (2023). The Anatomage Table: A Promising Alternative in Anatomy Education. Cureus, 15(8), e43047. https://doi.org/10.7759/cureus.43047

16. Бойко Ю.М., Мельник В.Г., Мартиненко С.О., Луцак О.О., Гринзовський А.М., Калашченко С.І. Симуляційні технології, як невід'ємна складова підготовки сучасного лікаря. Медична симуляція – погляд у майбутнє (впровадження інноваційних технологій у вищу медичну освіту України) (для лікарів, науковців та молодих вчених) : наук.-практ. конф. з міжнар. участю. Чернівці, 17-18.02.2023 року: тези доп. /Чернівці: БДМУ. – 297с.

17. Ternopil National Medical University. (2018, December ?). New simulation rooms for family doctors have been opened at Ternopil Medical University. MedEdu.org.ua. Retrieved from https://mededu.org.ua/en/news/new-simulation-rooms-for-family-doctors-have-been-opened-at-ternopil-medical-university/

18. Moll-Khosrawi, P., Zöllner, C., Cronje, J. S., & Schulte-Uentrop, L. (2021). The effects of simulation-based education on medical students' motiva-

tion. International journal of medical education, 12, 130–135. https://doi.org/10.5116/ijme.60c0.981e

References

1. Protsak T.V., Zabrodskyi I.S. Znachennia 3D-modeliuvannia u vyvchenni anatomii stovbura mozku. Modern Science, Economy and Digital Innovation: Collection of Scientific Papers with Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference. International Scientific Unity. May 7–9, 2025. Bucharest, Romania. Pp. 279–283

2. Protsak T.V., Zabrodskyi I.S., Hutsal V.O. Mobilni dodatky yak dopomizhnyi instrument u vyvchenni anatomii liudyny. Science, Technology and Global Challenges. Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference. CPN Publishing Group. Tokyo, Japan. 2025. Pp. 55–65.

3. Protsak T.V., Zabrodskyi I.S., Yasinskyi M.M. Psykholohichna adaptatsiia studentiv do zaniat u sektsiinii zali: pedahohichni ta etychni aspekty. Perspektyvy ta innovatsii nauky (Seriia “Pedahohika”, Seriia “Psykholohiia”, Seriia “Medytsyna”): zhurnal. 2025. № 10(56). Pp. 2711–2727. https://doi.org/10.52058/2786-4952-2025-10(56)-2711-2727

4. Protsak T.V., Zabrodskyi I.S., Filipchuk A.D., Hutsal V.O. Formuvannia praktychnykh navychok z anatomii liudyny za dopomohoiu symuliatsiinykh tekhnolohii // International Experience in Scientific Research. Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference. BoScience Publisher. Chicago, USA. 2025. Pp. 76–83.

5. Aridan, N., Bernstein-Eliav, M., Gamzo, D., Schmeidler, M., Tik, N., & Tavor, I. (2024). Neuroanatomy in virtual reality: Development and pedagogical evaluation of photogrammetry-based 3D brain models. Anatomical sciences education, 17(2), 239–248. https://doi.org/10.1002/ase.2359

6. Cercenelli, L., De Stefano, A., Billi, A. M., Ruggeri, A., Marcelli, E., Marchetti, C., Manzoli, L., Ratti, S., & Badiali, G. (2022). AEducaAR, Anatomical Education in Augmented Reality: A Pilot Experience of an Innovative Educational Tool Combining AR Technology and 3D Printing. International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(3), 1024. https://doi.org/10.3390/ijerph19031024

7. Patra, A., Asghar, A., Chaudhary, P., & Ravi, K. S. (2022). Integration of innovative educational technologies in anatomy teaching: new normal in anatomy education. Surgical and radiologic anatomy : SRA, 44(1), 25–32. https://doi.org/10.1007/s00276-021-02868-6

8. Owolabi, J.O., Gardner, K., Agboola, R. et al. Use of simulation for teaching biomedical sciences to undergraduate medical students- a scoping review. BMC Med Educ 25, 1259 (2025). https://doi.org/10.1186/s12909-025-07819-y

9. Gurses, M. E., Gökalp, E., Gecici, N. N., Gungor, A., Berker, M., Ivan, M. E., Komotar, R. J., Cohen-Gadol, A. A., & Türe, U. (2024). Creating a neuroanatomy education model with augmented reality and virtual reality simulations of white matter tracts. Journal of neurosurgery, 141(3), 865–874. https://doi.org/10.3171/2024.2.JNS2486

10. Ye, Z., Dun, A., Jiang, H. et al. The role of 3D printed models in the teaching of human anatomy: a systematic review and meta-analysis. BMC Med Educ 20, 335 (2020). https://doi.org/10.1186/s12909-020-02242-x

11. Hernández-Aceituno, J., Arnay, R., Hernández, G., Ezama, L., & Janssen, N. (2022). Teaching the Virtual Brain. Journal of digital imaging, 35(6), 1599–1610. https://doi.org/10.1007/s10278-022-00652-5

12. Lane Medical Library, Stanford University School of Medicine. (2023, September 1). Complete Anatomy [Blog post]. https://laneblog.stanford.edu/2023/09/01/complete-anatomy/

13. Lilly J. (2022). 3D Organon VR Anatomy. Journal of the Medical Library Association : JMLA, 110(2), 276–278. https://doi.org/10.5195/jmla.2022.1341

14. Department of Physiology, Anatomy and Genetics (DPAG), University of Oxford. (2024). Medical students at Oxford explore human anatomy using virtual reality (VR). Retrieved November 4, 2025, from https://www.ctl.ox.ac.uk/testing-a-virtual-reality-vr-application

15. Kavvadia, E. M., Katsoula, I., Angelis, S., & Filippou, D. (2023). The Anatomage Table: A Promising Alternative in Anatomy Education. Cureus, 15(8), e43047. https://doi.org/10.7759/cureus.43047

16. Boiko Yu.M., Melnyk V.H., Martynenko S.O., Lutsak O.O., Hrynzovskyi A.M., Kalashchenko S.I. Symuliatsiini tekhnolohii yak nevid'iemna skladova pidhotovky suchasnoho likaria. Medychna symuliatsiia – pohliad u maibutnie (vprovadzhennia innovatsiinykh tekhnolohii u vyshchu medychnu osvitu Ukrainy) (dlia likariv, naukovtsiv ta molodykh vchenykh): nauk.-prakt. konf. z mizhnar. uchastiu. Chernivtsi, 17–18.02.2023 roku: tezy dop. / Chernivtsi: BDMU. – 297 p.

17. Ternopil National Medical University. (2018, December ?). New simulation rooms for family doctors have been opened at Ternopil Medical University. MedEdu.org.ua. Retrieved from https://mededu.org.ua/en/news/new-simulation-rooms-for-family-doctors-have-been-opened-at-ternopil-medical-university/

18. Moll-Khosrawi, P., Zöllner, C., Cronje, J. S., & Schulte-Uentrop, L. (2021). The effects of simulation-based education on medical students' motivation. International journal of medical education, 12, 130–135. https://doi.org/10.5116/ijme.60c0.981e