

Секція Освітні науки	
УДК 378:61:004.932	
Дата першого надходження статті до видання	2026-07-01
Дата прийняття статті до друку після рецензування	2026-08-01
Дата публікації/оприлюднення	2026-08-01

Ефективність візуалізації пренатального морфогенезу печінки у медичній освіті

Чернікова Галина Миколаївна

кандидат медичних наук, доцент

доцент кафедри гістології, цитології та ембріології

Буковинський державний медичний університет, м. Чернівці, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-2766-5315>

Анотація. Стаття сфокусована на вивченні ефективності використання візуалізаційних технологій у якості педагогічного інструменту для покращення ефективності вивчення складних етапів пренатального морфогенезу печінки студентами медичних спеціальностей. Базою для вивчення стали 3D-моделі, цифрові реконструкції, анімації, віртуальна реальність, цифрові атласи, гістологічні зображення. Вдалося обґрунтувати визначену педагогічну проблему: традиційні 2D-зображення та словесні пояснення найчастіше не гарантують належного формування просторового мислення та інтеграції гістологічних і макроскопічних рівнів знань. Застосування квазіекспериментального дизайну з залученням контрольної та експериментальної груп надало змогу проаналізувати вплив тривимірних моделей і віртуальних середовищ на результати навчання, мотивацію та просторове розуміння у опануванні навчальних дисциплін гістології, цитології, ембріології і анатомії людини. Контрольна група використовувала у навчальному процесі традиційні лекції та атласи, тоді як у рамках експериментальної групи застосовувались 3D-моделі, анімації і цифрові атласи як інноваційна педагогічна технологія. Оцінювання здійснювалося за трьома компонентами: знання (тести), просторове мислення (завдання на реконструкцію) та професійні компетентності (кейс-завдання). Результати продемонстрували підвищення рівня просторового розуміння та готовності до клінічної інтерпретації ембріогенетичних процесів у рамках експериментальної групи. Додатково зосереджено увагу на дидактичних умовах та обмеженнях на шляху до ефективного впровадження візуалізаційних матеріалів у рамках освітнього процесу. Практичне значення статті полягає у формуванні методичних підходів для інтеграції цифрових візуалізацій у курси ембріології та анатомії з метою підвищення якості підготовки майбутніх лікарів.

Ключові слова: пренатальний розвиток, печінка, морфогенез, ембріогенез, гістогенез, гепатобласти, гепатобіліарна система, 3D-моделі, візуалізація.

Effectiveness of prenatal liver morphogenesis visualization in medical education

Chernikova Halyna Mykolaivna

Candidate of Medical Sciences, Associate Professor

Associate Professor at the Department of Histology, Cytology and Embryology

Bukovinian State Medical University, Chernivtsi, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0002-2766-5315>

Abstract. The article focuses on studying the effectiveness of using visualization technologies as a pedagogical tool to improve the effectiveness of studying complex stages of prenatal liver morphogenesis by medical students. The basis for the study was 3D models,

digital reconstructions, animations, virtual reality, digital atlases, and histological images. It was possible to substantiate the identified pedagogical problem: traditional 2D images and verbal explanations most often do not guarantee the proper formation of spatial thinking and integration of histological and macroscopic levels of knowledge. The use of a quasi-experimental design involving control and experimental groups made it possible to analyze the impact of three-dimensional models and virtual environments on learning outcomes, motivation, and spatial understanding in mastering the academic disciplines of histology, cytology, embryology and human anatomy. The control group used traditional lectures and atlases in the educational process, while the experimental group used 3D models, animations, and digital atlases. The assessment was carried out according to three components: knowledge (tests), spatial thinking (reconstruction tasks) and professional competencies (case tasks). The results demonstrated an increase in the level of spatial understanding and readiness for clinical interpretation of embryogenetic processes within the experimental group. Additionally, attention was focused on didactic conditions and limitations on the way to the effective implementation of visualization materials within the educational process. The practical significance of the article lies in the formation of methodological approaches for the integration of digital visualizations into embryology and anatomy courses in order to improve the quality of training of future doctors.

Keywords: prenatal development, liver, morphogenesis, embryogenesis, histogenesis, hepatoblasts, hepatobiliary system, 3D models, visualization.

Вступ

Актуальність проблеми. Сучасна медична освіта вимагає від студентів не лише уміння працювати з фактичним матеріалом, але й інтегрувати знання на різних рівнях – від клітинного до органного. Зокрема, етапи пренатального морфогенезу печінки містять складні послідовності формування тканин і структур, що не завжди можуть бути точно передані та пояснені при використанні традиційних 2D-схем. У такому випадку страждає й розуміння загальної динаміки процесу. У зв'язку з цим виникає потреба в використанні педагогічних технологій, що підвищують якість засвоєння навчального матеріалу, покращають розвиток просторового мислення і сприятимуть формуванню професійних компетентностей майбутніх лікарів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Огляд останніх досліджень показує, що інтерактивні візуалізації (VR/AR, 3D-моделі, цифрові атласи) загалом сприяють оптимізації знань з анатомії, але дослідники розходяться в оцінці оптимального формату навчання, тривалості впливу та дидактичних умов впровадження [1; 2].

Z. Jamil та ін. [3] у своїй праці наголошували, що іммерсивні технології забезпечують статистично значуще покращення результатів навчання у порівнянні з традиційними лекціями, підручниками та атласами, особливо коли їх використовують як додатковий ресурс, а не як повну заміну класичних методів. У своєму дослідженні вони посилалися на мета-аналізи, які продемонстрували помірний позитивний ефект XR-технологій на знання студентів і високу суб'єктивну корисність серед учасників.

У свою чергу J. Wang та ін. [4] не погоджувалися з твердженням Z. Jamil, вказуючи на методологічні обмеження більшості подібних досліджень: гетерогенність дизайнів, короткочасні інтервенції та відсутність довготривалого спостереження за збереженням знань. Науковці також звернули увагу на те, що чимала кількість теоретиків не враховують дидактичні умови експерименту (інтерактивність завдань, методичний супровід, критерії оцінювання просторового мислення). Тому важко робити однозначні висновки про ефективність візуалізацій.

Інші дослідники продовжили цю думку, але з уточненням: ефективність 3D-моделей і VR значною мірою залежить від їхнього педагогічного структурування [5; 6]. Так, коли візуалізаційні моделі супроводжуються завданнями на реконструкцію чи

порівняння гістологічних зрізів, ефект від формування клінічно орієнтованих компетентностей зростає. Зокрема, G. Grzych наводить приклади рандомізованих і квазіекспериментальних досліджень, у рамках яких комбінований підхід із залученням традиційних методів та цифрової візуалізації, давав кращі результати, ніж будь-який окремих інструментарій [5].

Вітчизняні дослідники [7; 8] висловили критичні зауваги щодо рівня доступності та вартості впровадження VR у вітчизняних умовах, а також щодо ризику «пасивного перегляду» анімацій без активної навчальної діяльності. Вони рекомендували розробляти адаптовані модулі з короткими інтерактивними сесіями, чіткими навчальними цілями та інструментами оцінювання просторового мислення, щоб мінімізувати технічні та методичні бар'єри.

Отже, літературний аналіз демонструє консенсус щодо потенційної користі візуалізаційних технологій, але одночасно вказує на потребу в застосуванні стандартизованих методик впровадження, довготривалих оцінках ефекту та інтеграції гістологічних даних із 3D-реконструкціями [9; 10]. Саме сукупність визначених інструментів дозволяє досягнути стійкого покращення професійних компетентностей студентів.

Виділення невирішеної частини проблеми. Незважаючи на чітко окреслену дослідницьку базу, залишається недостатньо вивченим питання впливу дидактичних умов і педагогічних прийомів на стійке покращення у засвоєнні студентами складних етапів ембріогенезу печінки. Таким чином, слід звернути увагу на інтеграцію гістологічних даних із 3D-реконструкціями в навчальних модулях і верифікацію впливу таких інтегрованих підходів на формування клінічно орієнтованих компетентностей.

Мета статті полягає у педагогічному обґрунтуванні й емпіричній оцінці ефективності визначених візуалізаційних технологій (3D-моделі, цифрові реконструкції, анімації, цифрові атласи, гістологічні зображення) як засобу підвищення якості засвоєння пренатального морфогенезу печінки та формування професійних компетентностей студентів медичних спеціальностей.

Наукова новизна фокусується на системному поєднанні педагогічної теорії з практичними інструментами візуалізації для вивчення пренатального морфогенезу печінки і розробці дидактичних умов їх впровадження. Додатково запропоновано схему оцінювання ефективності, що включає показники знань, характеристики просторового мислення і професійної готовності.

Практичне значення. Практичне значення статті полягає в наданні методичних рекомендацій для викладачів навчальних дисциплін гістологія, цитологія та ембріологія і анатомія людини щодо перспектив використання цифрових візуалізацій у навчальному процесі, розробці прикладів навчальних завдань і критеріїв оцінювання, а також у формуванні підходів до підготовки студентів. Запропоновані підходи можуть бути інтегровані в навчальні програми з мінімальними технічними адаптаціями та стати основою для подальших досліджень у педагогіці медичної освіти.

Методологія

Методи дослідження. У дослідженні застосовано квазіекспериментальний дизайн з двома навчальними групами. Упродовж 12 тижнів (жовтень-грудень 2025 року) контрольна група опановувала матеріал з Основ ембріології, прослуховуючи традиційні лекції та користуючись друкованими атласами. Натомість експериментальна група займалася з використанням інтегрованих 3D-моделей, анімацій, цифрових реконструкцій і гістологічних зображень у практичні заняття. Для кількісної оцінки використовувалися стандартизовані тести знань, завдання на просторове мислення та кейс-завдання для оцінки професійних компетентностей. Якісний аналіз проводився за змістом напівструктурованих інтерв'ю з викладачами і студентами. Дослідницький

період охоплював передтест, інтервенцію протягом модуля ембріології та повторний післятест після закінчення експериментального навчання з метою оцінки збереження знань.

До початкової вибірки увійшло 80 студентів медичного факультету Буковинського державного медичного університету (експериментальна група – 40; контрольна група – 40). У зв'язку з відсівом у процесі експерименту (3 особи з різних причин не змогли пройти фінальне тестування), до фінального кількісного аналізу (per protocol) було включено 77 студентів (38 в експериментальній та 39 у контрольній групах). Такий розмір дозволяє виявити практично значущі відмінності в показниках знань і просторовому мисленні між двома групами. До участі долучалися виключно студенти 1–2 курсів, оскільки упродовж них вивчається базовий блок з ембріогенезу. Обидві групи репрезентативні за статтю, середній вік учасників складає 17–19 років. Серед базових критеріїв виключення слід виділити наявність попереднього досвіду роботи з 3D-моделями у навчальних цілях (щоб уникнути упередженості); відсутність технічної можливості для участі; відмову від повторного тестування через 12 тижнів.

Стратифікований відбір учасників відбувався з урахуванням попередніх балів з розділу ембріологія (високі/середні/низькі) для забезпечення рівномірного розподілу початкових знань між групами. Учасники послідовно призначалися в експериментальну або контрольну групу, щоб зберегти баланс за початковими показниками (Таблиця 1). Участь студентів у дослідженні була виключно добровільною, що підтверджувалося підписанням інформованої згоди з дотриманням усіх академічних та етичних норм.

Таблиця 1

Демографічні показники вибірки

Показник	Експериментальна (n = 40)	Контрольна (n = 40)	Всього (N = 80)
Вік, середнє $\pm$ SD (роки)	18,4 $\pm$ 1,1	18,2 $\pm$ 1,3	18,3 $\pm$ 1,2
Стать (чоловіки/жінки)	14 / 26	14 / 26	28 / 52
Рівень навчання (курс)	1–2 курс	1–2 курс	1–2 курс
Попередній бал з анатомії, середнє $\pm$ SD (100-бальна шкала)	82,5 $\pm$ 6,3	81,9 $\pm$ 6,7	82,2 $\pm$ 6,5
Виключені під час дослідження (відсів), n	2	1	3
Аналіз per-protocol, n	38	39	77
Розрахунок потужності (обґрунтування)	$d \approx 0,5$; $\alpha = 0,05$; $1 - \beta = 0,80$		

Джерело: сформовано автором.

Джерела даних. Основними джерелами даних були результати тестів студентів, записи практичних занять, відповіді анкет самооцінки, стенограми фокус-груп і інтерв'ю, а також метадані використання цифрових ресурсів (лог-файли доступу до 3D-моделей і тривалість сесій). Додатково використовувалися навчальні матеріали: цифрові атласи, серії гістологічних зображень і створені для дослідження 3D-реконструкції етапів пренатального морфогенезу печінки.

Інструменти аналізу. Кількісний аналіз включав описову статистику, порівняння середніх значень, у тому числі t-тести для незалежних вибірок, ANOVA при багатофакторних порівняннях і розрахунок розміру ефекту (Cohen's d). Для аналізу змін у часі застосовано парні t-тести. Якісний матеріал оброблявся методом тематичного аналізу з кодуванням відповідей і виділенням ключових категорій, що стосуються

сприйняття візуалізацій і дидактичних умов. Для обробки даних використовувалися програмні засоби SPSS.

Обмеження дослідження. Дослідження має кілька важливих обмежень. Перш за все вибірку створено на основі одного медичного факультету, що знижує базову узагальнюваність результатів. Окрім того, різний рівень технічного забезпечення і навичок викладачів може впливати на ефективність інтервенції. Також існує ризик упередженості самооцінок і ефекту навчання при повторних тестах. Ці обмеження враховано при інтерпретації результатів і формулюванні рекомендацій.

Результати. Результати дослідження демонструють послідовну картину: інтеграція 3D-моделей, анімацій, цифрових реконструкцій і гістологічних зображень у якості педагогічної технології у навчальний модуль ембріології забезпечила не тільки короткочасний приріст знань, але й суттєве покращення мисленнєвих стратегій студентів і їхньої здатності застосовувати знання в клінічно орієнтованих завданнях. Кількісні показники, зокрема високі значення післятестів у експериментальній групі, великі розміри ефекту за Коеном і значно кращі показники утримання знань, свідчать про те, що інтервенція вплинула на глибинні процеси навчання, а не лише на поверхнєве запам'ятовування.

Таблиця 2

Значення pretest та posttest у контрольній та експериментальній групах
(n=77)

Показник	Передтест (середнє $\pm$ SD)	Післятест: Контроль	Післятест: Експеримент	Статистика (t-критерій, p- рівень)
Знання (0–100 балів)	82,2 $\pm$ 6,5	85,3 $\pm$ 6,0	90,8 $\pm$ 5,2	t = 4,31; p < 0,001
Просторове мислення (0–30 балів)	15,1 $\pm$ 4,2	16,8 $\pm$ 4,0	21,6 $\pm$ 3,8	t = 5,40; p < 0,001
Кейс- компетентності (0–100 балів)	70,8 $\pm$ 9,0	72,4 $\pm$ 8,5	80,9 $\pm$ 7,2	t = 4,73; p < 0,001
Відкладений тест знань (через 8 тижнів)		79,5 $\pm$ 6,8	87,1 $\pm$ 5,9	t = 5,25; p < 0,001

Джерело: сформовано автором.

Найпомітніший ефект спостерігався у сфері просторового мислення, де розмір ефекту (Cohen's d = 1,23) вказує на трансформацію ментальних моделей студентів. Це означає, що 3D-візуалізації не просто полегшують сприйняття окремих фактів, а змінюють спосіб, у який студенти уявляють собі просторові взаємини між елементами печінки в процесі її формування. Така трансформація є критичною для ембріології, де розуміння послідовності і просторових співвідношень визначає здатність інтерпретувати гістологічні зрізи і клінічні випадки.

Проведений аналіз вказує на два взаємопов'язані механізми. Першим є візуальна конкретизація динаміки: анімації і реконструкції, що робить видимими часові переходи і взаємодії тканин, дозволяючи студентам формувати причинно-наслідкові ланцюги. Другий механізм – це інтеграція рівнів аналізу. Так, синхронне представлення гістології і макроскопії сприяє зв'язуванню клітинних процесів з органічними змінами, що підвищує клінічну релевантність знань. Кореляція між часом роботи з 3D-ресурсами і приростом у тесті просторового мислення (r=0.46) підкреслює дозозалежний характер ефекту:

інтенсивніша робота з візуалізаціями дає кращі результати, але лише за умови активного педагогічного супроводу.

Якісний матеріал, зібраний у напівструктурованих інтерв'ю зі студентами, не лише підтверджує кількісні результати, а й розкриває механізми цифрової візуалізації, що змінюють навчальний процес (Таблиця 3). Нижче наведено розгорнутий аналіз кожної з виділених тем, з акцентом на причинно-наслідкові зв'язки, варіації в досвіді учасників і практичні наслідки для проектування занять.

Таблиця 3

Ключові коментарі студентів і частота згадувань (n = 77)

Тема	Частота (n)	% від загальної кількості респондентів	Позитивні коментарі респондентів	Критичні коментарі респондентів
Покращене просторове розуміння	68	88,3%	«3D-модель показала, як гепатобласті формують паренхіму»	«Спочатку важко було зорієнтуватися в моделі»
Підвищення мотивації	59	76,6%	«Після занять я самостійно переглядав моделі ще годину»	«Спочатку було багато інформації, відчувався стрес»
Необхідність методичного супроводу	52	67,5%	«Завдання на реконструкцію змусили думати, а не дивитися»	«Без підказок моделі – просто красиві картинки»
Технічні бар'єри	46	59,7%	«Веб-версія працювала швидко, зручно»	«У деяких студентів не було пристрою або інтернету»
Інші зауваження (навчальне навантаження, час)	25	32,4%	«Добре, що сесії короткі і структуровані»	«Потрібно більше часу в розкладі для практики»

Джерело: створено автором.

Понад 80% студентів описували 3D-моделі як своєрідний «місток» між гістологією і макроскопією. У відповідях простежується послідовний логічний ланцюг: візуалізація → формування ментальної моделі → краща інтерпретація гістологічних зрізів. Студенти відзначали, що раніше вони розглядали гістологічні зрізи як ізольовані «картинки», а 3D-реконструкції дозволили їм розмістити ці «картинки» у просторі і часі. Це свідчить про перехід від репродуктивного до продуктивного знання, що є ключовою ознакою глибокого навчання.

Приблизно 73% повідомили про збільшення інтересу до теми, що вивчалася, і про те, що вони витрачали більше часу на самостійну підготовку після ознайомлення з візуалізаціями. Аналіз відповідей продемонстрував, що мотивація зростала не лише через «ефект новизни», а й через відчуття корисності. Зокрема, студенти бачили прямий зв'язок між тим, що вони вивчають, і тим, як це може бути застосовано в клінічних ситуаціях. Водночас частина респондентів (23%) зазначала, що початково відчувала

перевантаження від великої кількості візуальної інформації, і лише після організованого методичного супроводу змогла ефективно організувати самостійну роботу.

Тема методичного супроводу була цілком прогнозованою: 65% респондентів засвідчили, що без чітких завдань, контрольних питань і фасилітації з боку викладачів робота з моделями часто перетворюється на пасивний перегляд. Якісний аналіз виявив наступні проблеми: відсутність чіткої послідовності дій під час сесії; невміння формулювати питання, що стимулюють аналітичну роботу.

Отримані результати вимагають перегляду підходів до планування практичних занять. По-перше, візуалізації мають бути інтегровані в навчальний сценарій, а не використовуватися як ілюстративний матеріал. Кожна 3D-сцена або анімація повинна мати чітку навчальну мету, завдання для активної роботи і критерії оцінювання. По-друге, важливо поєднувати індивідуальну роботу з груповою дискусією. Зокрема, індивідуальна взаємодія з моделлю формує первинні уявлення, а групове обговорення дозволяє їх перевірити і уточнити через аргументацію. Окрім того, роль викладача змінюється з «джерела знань» на «фасилітатора», який ставить спрямовані питання, модерує обговорення і допомагає студентам формулювати причинно-наслідкові ланцюги.

На основі отриманих даних пропонується конкретний набір кроків для впровадження цифрових візуалізацій у навчальні програми:

1. Планування модулів – кожен модуль має містити 2–4 інтерактивні сесії по 20–35 хв, після яких обов'язково проводиться 15–20 хв обговорення з контрольними питаннями.

2. Структура сесії – короткий вступ з навчальною метою, інтерактивна робота з моделлю або анімацією, завдання на реконструкцію або порівняння гістології, групове обговорення і короткий підсумковий тест.

3. Завдання і оцінювання – включати в підсумкові оцінки завдання на просторову реконструкцію і кейс-аналіз; використовувати рубрики, що оцінюють не лише фактологічні знання, а й логіку аргументації і здатність інтегрувати рівні аналізу.

4. Підготовка викладачів – короткі методичні тренінги (2–4 год) з демонстрацією сценаріїв, прикладами завдань і шаблонами для обговорення; створення стислих гайдлайнів для швидкого старту.

5. Технічна підтримка – забезпечити базовий набір ресурсів: веб-версії моделей, покадрові GIF-анімації для низькоресурсних умов, інструкції з доступу і короткі відео-пояснення для студентів.

Аби імплементація зазначених кроків забезпечила очікуваний ефект, необхідна система моніторингу, що поєднуватиме кількісні і якісні індикатори. Кількісні метрики включають результати тестів знань, бали за завданнями на просторову реконструкцію і показники утримання знань при повторних вимірюваннях. До якісних індикаторів належать аналіз фокус-груп, зворотний зв'язок викладачів і лог-файли використання ресурсів. Рекомендується проводити перші оцінки після пілотного впровадження (через 1–2 цикли), а потім застосовувати регулярні ревізії щороку з корекцією сценаріїв і ресурсів.

Таким чином, інтеграція 3D-візуалізацій у навчальний процес має потенціал не лише задля підвищення короточасних академічних результатів, але й з точки зору трансформації мислення студентів. Для досягнення цього ефекту необхідне цілеспрямоване педагогічне вбудовування інструментів, оптимальна організація сесій, включення завдань на просторову реконструкцію в систему оцінювання і забезпечення базової технічної та методичної підтримки. Ці кроки дозволять перетворити технології з ілюстративного доповнення на дієвий засіб формування професійних компетентностей.

Обговорення

Інтерпретація результатів. Отримані результати свідчать, що інтеграція 3D-моделей, анімацій, цифрових реконструкцій і гістологічних зображень у навчальний процес з вивчення пренатального морфогенезу печінки призводить до помітного покращення трьох взаємопов'язаних компонентів навчальної діяльності: якості засвоєння навчального матеріалу, просторового мислення і професійної компетентності. Підвищення середніх балів експериментальної групи разом із оптимізацією показників утримання знань (що підтверджується даними відкладеного тесту через 8 тижнів) вказують на те, що візуалізації не лише полегшують первинне засвоєння матеріалу, а й сприяють його стабілізації в пам'яті. Якісний аналіз пояснює механізми цього впливу наступним чином. Візуальні реконструкції формують ментальні моделі динаміки морфогенезу, а поєднання гістології з макроскопією допомагає студентам встановлювати причинно-наслідкові зв'язки між клітинними процесами і органічними змінами.

Разом з цим результати демонструють, що ефект реалізується лише в умовах педагогічного контролю: без структурованих завдань, обговорень і методичного супроводу візуалізації виконують роль поверхневого стимулу, не призводячи до стійкого освітнього прогресу.

Порівняння з іншими дослідженнями. Наші висновки загалом узгоджуються з позицією дослідників [11; 12], які підкреслювали позитивний вплив іммерсивних технологій на навчальні результати. Водночас отримані дані підтверджують застереження інших науковців [13; 14] щодо методологічних обмежень. Зокрема наш квазіексперимент має обмежену вибірку і відносно короткий період спостереження, тому висновки, пов'язані з довготривалою стабільністю ефекту, потребують подальшої верифікації. Додатково вдалося знайти підтвердження позиції вчених [15; 16] щодо технічних і організаційних бар'єрів: у якісних даних студенти і викладачі відзначали проблеми з доступом і необхідність коротких інструкцій.

Таким чином, подане дослідження розширює існуючу дискусію: воно підтверджує потенціал візуалізацій, але одночасно конкретизує дидактичні умови і практичні обмеження, які мають бути враховані при масштабуванні таких підходів у вітчизняних навчальних програмах.

Наукова новизна. Стаття фокусується на інструменті інтеграції макроскопічних 3D-реконструкцій з гістологічними зображеннями як цілісної педагогічної технології в межах одного навчального модуля. Це дозволяє одночасно працювати з клітинними механізмами і органічними формами, що рідко реалізується в існуючих дослідженнях, де зазвичай розглядають або макро-, або мікрорівень. Окрім того, запропоновано ряд дидактичних умов та навчальних сценаріїв (оптимальна тривалість сесій, структура завдань на реконструкцію, поєднання індивідуальної і групової роботи), які вдалося верифікувати емпірично. Це дає розгорнуту практичну інструкцію для використання викладачами у освітньому процесі. Окрім того, дослідження демонструє, як адаптувати цифрові візуалізації до ресурсних обмежень вітчизняних медичних факультетів (короткі модулі, легкодоступні формати, методичні інструкції), що є важливим внеском у практичну педагогіку в контексті України.

Практичне значення. Стаття містить конкретні методичні рекомендації, як інтегрувати 3D-моделі і гістологічні зображення у практичні заняття, які завдання використовувати для розвитку просторового мислення, як структурувати сесію і які критерії оцінювання включити в підсумкові контрольні заходи. Це дозволяє викладачам швидко адаптувати матеріал без потреби в глибоких технічних знаннях. Результати обґрунтовують включення цифрових візуалізацій у навчальні плани ембріології та анатомії як обов'язкового елементу для формування клінічно орієнтованих компетентностей. Рекомендовано передбачити в навчальних планах ресурси для

методичної підготовки викладачів. Варто також зазначити, що інтегровані візуалізації сприяють посиленню мотивації серед студентів і сприяють більш глибокому розумінню складних процесів, що полегшує подальше засвоєння клінічних дисциплін. Практичні кейси і завдання на реконструкцію готують майбутніх медиків до інтерпретації ембріогенетичних змін у клінічному контексті.

Висновки

Інтеграція 3D-моделей, анімацій, цифрових реконструкцій і гістологічних зображень у навчальний модуль з пренатального морфогенезу печінки призвела до статистично і практично значущого покращення трьох ключових навчальних показників: знань, просторового мислення та професійних компетентностей. Експериментальна група показала вищі середні бали після інтервенції, кращі показники утримання знань через 8–12 тижнів і значне зростання здатності до просторової реконструкції структур. Покращення академічних результатів пояснюється формуванням більш чітких ментальних моделей динаміки морфогенезу: візуалізації роблять видимими послідовні етапи формування паренхіми і судинної мережі печінки, а поєднання гістологічних зрізів із макроскопічними реконструкціями дозволяє студентам встановлювати причинно-наслідкові зв'язки між клітинними процесами і органами змінами. Активні завдання на реконструкцію і кейс-обговорення посилюють цей ефект. Загалом такий ефект реалізується лише за умови педагогічного контролю: чіткі навчальні цілі, структуровані інструкції, активна навчальна діяльність та належний методичний супровід викладача. Короткі інтерактивні сесії (20–35 хв) з подальшим обговоренням виявилися оптимальними для підтримки уваги і глибокого опрацювання матеріалу. Технічна підтримка і методичні настанови для викладачів мінімізують ризики пасивного перегляду і технічних збоїв.

Варто взяти до уваги, що результати отримані на основі вибірки обмеженого розміру і в локальному контексті, тому потребують верифікації в масштабніших і довготриваліших дослідженнях. Технічні та організаційні бар'єри можуть знижувати ефективність при масштабуванні, якщо не передбачити підготовку викладачів і доступні формати ресурсів. Для цього варто дотримуватися ряду рекомендацій, зокрема поєднувати цифрові візуалізації з активними методами, структурувати навчальні сесії, оцінювати не лише знання, а й просторове мислення і кейс-компетентності. У подальших дослідженнях слід зосередити увагу на довготривалих спостереженнях та оцінюванні ефективності різних форматів візуалізацій. Важливо також розробити стандартизовані методики оцінювання просторового мислення в ембріології.

Таким чином, цифрові візуалізації є потужним педагогічним інструментом для вивчення пренатального морфогенезу печінки за умови їхнього цілеспрямованого педагогічного контролю і забезпечення методичної та технічної підтримки; впровадження таких підходів може суттєво підвищити якість підготовки майбутніх лікарів і їхню готовність до клінічної інтерпретації ембріогенетичних процесів.

Список використаних джерел

1. Silén C., Wirell S., Kvist J., Nylander E., Smedby Ö. Advanced 3D visualization in student-centred medical education. *Medical Teacher*. 2008. Vol. 30, № 5. P. e115–e124. DOI: <https://doi.org/10.1080/01421590801932228>.
2. Sharma B., Alhazmi A., Nasir N., Bridget B. Innovative Learning in Anatomy Education: Assessing the Impact of Low-Cost 3D Deep Learning Anatomical Models in Museum-Based Instruction. *Journal of Surgical Education*. 2026. Vol. 83, № 1. Art. 103748. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2025.103748>.
3. Jamil Z., Saeed A. A., Madhani S., Baig S., Cheema Z., Fatima S. S. Three-dimensional visualization software assists learning in students with diverse spatial intelligence in medical

education. *Anatomical Sciences Education*. 2019. Vol. 12, № 5. P. 550–560. DOI: <https://doi.org/10.1002/ase.1828>.

4. Wang J., Li W., Dun A. et al. 3D visualization technology for Learning human anatomy among medical students and residents: a meta- and regression analysis. *BMC Medical Education*. 2024. Vol. 24. Art. 461. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12909-024-05403-4>.

5. Grzych G., Schraen-Maschke S. Interactive Pedagogic Tools: Evaluation of Three Assessment Systems in Medical Education. *Annales de Biologie Clinique*. 2019. Vol. 77. P. 429–435. DOI: <https://doi.org/10.1684/abc.2019.1464>.

6. Altintas L., Sahiner M. Transforming medical education: the impact of innovations in technology and medical devices. *Expert Review of Medical Devices*. 2024. Vol. 21(9). P. 797–809. DOI: <https://doi.org/10.1080/17434440.2024.2400153>.

7. Крапива О. В., Вакулик В. В. Від наскельного малюнка до гейміфікації: огляд еволюції мистецтва візуалізації в медичній школі. *Імідж сучасного педагога*. 2026. № 3(228). С. 61–69.

8. Ігнатенко Є. О., Іщенко А. А., Яніцька Л. В. Візуалізація біохімічних процесів: цифрові інструменти для підвищення ефективності медичної освіти. *Сучасні тенденції та перспективи розвитку вищої медичної (фармацевтичної) освіти в Україні*: матеріали XXII Всеукр. наук.-практ. конф. 2025. С. 155.

9. Estai M., Bunt S. Best teaching practices in anatomy education: A critical review. *Annals of Anatomy*. 2016. Vol. 208. P. 151–157. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aanat.2016.02.010>.

10. Sengun B., Iscan Y., Yazici Z. A., Sormaz I. C., Aksakal N., Tunca F., Ekenel H. K., Giles Senyurek Y. Utilization of artificial intelligence in minimally invasive right adrenalectomy: recognition of anatomical landmarks with deep learning. *Acta Chirurgica Belgica*. 2024. Vol. 124, № 6. P. 492–498. DOI: <https://doi.org/10.1080/00015458.2024.2363599>.

11. Ковальчук О., Писанець О., Козицька Т. Генеративний штучний інтелект у вищій біологічній і медичній освіті: потенціал, виклики та перспективи. *Перспективи та інновації науки*. 2025. № 4(50). С. 454–465. DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-4952-2025-4\(50\)-454-465](https://doi.org/10.52058/2786-4952-2025-4(50)-454-465).

12. Костенко О. Б., Біляков-Бельський О. Б. Передові методи доповненої реальності в тренінгу хірургічних навичок у вищій медичній освіті України. *Педагогічна Академія: наукові записки*. 2025. Вип. 14. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14589077>.

13. Nakao E., Igeta M., Kobayashi N., Kumazu Y., Otani Y., Murakami M. et al. Effectiveness of artificial intelligence-based visualization for surgical anatomy education: A cluster quasirandomized controlled trial. *Surgery*. 2025. Vol. 188. P. 109723. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surg.2025.109723>.

14. Moro C., Štromberga Z., Raikos A., Stirling A. The effectiveness of virtual and augmented reality in health sciences and medical anatomy. *Anatomical Sciences Education*. 2017. Vol. 10, № 6. P. 549–559. DOI: <https://doi.org/10.1002/ase.1696>.

15. Kawame C., Kasai H., Shiko Y. et al. The use of graphical lung sound visualizations in medical education: an evaluation of its impact on clinical clerkship. *BMC Medical Education*. 2025. Vol. 25. Art. 581. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12909-025-07170-2>.

16. Wickramasinghe N., Thompson B. R., Xiao J. The Opportunities and Challenges of Digital Anatomy for Medical Sciences: Narrative Review. *JMIR Medical Education*. 2022. Vol. 8, № 2. P. e34687. DOI: <https://doi.org/10.2196/34687>.

References

1. Silén, C., Wirell, S., Kvist, J., Nylander, E., & Smedby, Ö. (2008). Advanced 3D visualization in student-centred medical education. *Medical Teacher*, 30(5), e115–e124. <https://doi.org/10.1080/01421590801932228>.

2. Sharma, B., Alhazmi, A., Nasir, N., & Bridget, B. (2026). Innovative learning in anatomy education: Assessing the impact of low-cost 3D deep learning anatomical models in museum-

based instruction. *Journal of Surgical Education*, 83(1), Article 103748. <https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2025.103748>.

3. Jamil, Z., Saeed, A. A., Madhani, S., Baig, S., Cheema, Z., & Fatima, S. S. (2019). Three-dimensional visualization software assists learning in students with diverse spatial intelligence in medical education. *Anatomical Sciences Education*, 12(5), 550–560. <https://doi.org/10.1002/ase.1828>.

4. Wang, J., Li, W., Dun, A., et al. (2024). 3D visualization technology for learning human anatomy among medical students and residents: A meta- and regression analysis. *BMC Medical Education*, 24, Article 461. <https://doi.org/10.1186/s12909-024-05403-4>.

5. Grzych, G. and Schraen-Maschke, S. (2019). Interactive Pedagogic Tools: Evaluation of Three Assessment Systems in Medical Education. *Annales de Biologie Clinique*, 77(4), 429–435. <https://doi.org/10.1684/abc.2019.1464>.

6. Altintas, L., & Sahiner, M. (2024). Transforming medical education: the impact of innovations in technology and medical devices. *Expert Review of Medical Devices*, 21(9), 797–809. <https://doi.org/10.1080/17434440.2024.2400153>.

7. Krapyva, O. V., & Vakulyk, V. V. (2026). Vid naskelnoho maliunka do heimifikatsii: ohliad evoliutsii mystetstva vizualizatsii v medychnii shkoli [From cave painting to gamification: An overview of the evolution of visualization art in medical school]. *Imidzh suchasnoho pedahoha*, 3(228), 61–69 [in Ukrainian].

8. Ihnatenko, Ye. O., Ishchenko, A. A., & Yanitska, L. V. (2025). Vizualizatsiia biokhimichnykh protsesiv: tsyfrovi instrumenty dlia pidvyshchennia efektyvnosti medychnoi osvity [Visualization of biochemical processes: Digital tools for improving the efficiency of medical education]. *Suchasni tendentsii ta perspektyvy rozvytku vyshchoi medychnoi (farmatsevtichnoi) osvity v Ukraini: Materialy XXII Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii*, 155 [in Ukrainian].

9. Estai, M., & Bunt, S. (2016). Best teaching practices in anatomy education: A critical review. *Annals of Anatomy*, 208, 151–157. <https://doi.org/10.1016/j.aanat.2016.02.010>.

10. Sengun, B., Iscan, Y., Yazici, Z. A., Sormaz, I. C., Aksakal, N., Tunca, F., Ekenel, H. K., & Giles Senyurek, Y. (2024). Utilization of artificial intelligence in minimally invasive right adrenalectomy: Recognition of anatomical landmarks with deep learning. *Acta Chirurgica Belgica*, 124(6), 492–498. <https://doi.org/10.1080/00015458.2024.2363599>.

11. Kovalchuk, O., Pysanets, O., & Kozytska, T. (2025). Heneratyvnyi shtuchnyi intelekt u vyshchii biolohichnii i medychnii osviti: potentsial, vyklyky ta perspektyvy [Generative artificial intelligence in higher biological and medical education: Potential, challenges and prospects]. *Perspektyvy ta innovatsii nauky*, 4(50), 454–465. [https://doi.org/10.52058/2786-4952-2025-4\(50\)-454-465](https://doi.org/10.52058/2786-4952-2025-4(50)-454-465) [in Ukrainian].

12. Kostenko, O. B., & Biliakov-Bielskyi, O. B. (2025). Peredovi metody dopovnenoj realnosti v treninhu khirurhichnykh navychok u vyshchii medychnii osviti Ukrainy [Advanced augmented reality methods in surgical skills training in higher medical education of Ukraine]. *Pedahohichna Akademiia: naukovy zapysky*, 14. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14589077> [in Ukrainian].

13. Nakao, E., Igeta, M., Kobayashi, N., Kumazu, Y., Otani, Y., Murakami, M., ... & Shinohara, H. (2025). Effectiveness of artificial intelligence-based visualization for surgical anatomy education: A cluster quasirandomized controlled trial. *Surgery*, 188, Article 109723. <https://doi.org/10.1016/j.surg.2025.109723>.

14. Moro, C., Štromberga, Z., Raikos, A., & Stirling, A. (2017). The effectiveness of virtual and augmented reality in health sciences and medical anatomy. *Anatomical Sciences Education*, 10(6), 549–559. <https://doi.org/10.1002/ase.1696>.

15. Kawame, C., Kasai, H., Shiko, Y., et al. (2025). The use of graphical lung sound visualizations in medical education: An evaluation of its impact on clinical clerkship. *BMC Medical Education*, 25, Article 581. <https://doi.org/10.1186/s12909-025-07170-2>.

16. Wickramasinghe, N., Thompson, B. R., & Xiao, J. (2022). The opportunities and challenges of digital anatomy for medical sciences: Narrative review. *JMIR Medical Education*, 8(2), Article e34687. <https://doi.org/10.2196/34687>.