

© 2024 by the author(s).

This work is licensed under Creative Commons Attribution 4.0 International License

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



How to cite / Як цитувати статтю: Petrov V, Pankiv M. [Application of three-dimensional digital technologies to display the structure of the heart]. *East Ukr Med J.* 2024;12(1):1-10

DOI: [https://doi.org/10.21272/eumj.2024;12\(1\):1-10](https://doi.org/10.21272/eumj.2024;12(1):1-10)

ABSTRACT

Vitaliy Petrov

<https://orcid.org/0000-0002-2205-5403>

Department of Surgery and Transplantology, Danylo Halytsky National Medical University, Lviv, Ukraine

Mariana Pankiv

<https://orcid.org/0000-0002-3714-2577>

Department of Surgery, Andrei Krupynskyi Lviv Medical Academy, Lviv, Ukraine

APPLICATION OF THREE-DIMENSIONAL DIGITAL TECHNOLOGIES TO DISPLAY THE STRUCTURE OF THE HEART

Introduction. It is difficult to display the heart structure with traditional drawings due to its complex three-dimensional structure. Therefore, to depict the heart anatomy, it became necessary to use three-dimensional models, and appropriate digital technologies for the latter became available in the recent decades.

Material and methods. Manuscripts reflecting the key stages of the emergence of three-dimensional digital technologies for the heart anatomy visualization and fields of their medical implementation were selected from the MEDLINE database.

Results. Three-dimensional reconstructions of the heart are created by the method of segmentation from the results of radiological examinations (computed tomography, magnetic resonance imaging, ultrasound diagnostics). The created models reproduce the anatomy of the cardiovascular system in vivo. Digital models are interactive and allow the user to explore the external form and internal structure. The images can be viewed on a computer screen or stereoscopically using a virtual reality headset and smart glasses, the models can be rotated at any angle, “immersed” into or divided into parts. Repeated manipulations that are impossible with real organs can be performed on the reconstructions (virtual autopsy). The new tools are used in education and teaching anatomy, fundamental research of the structure of the normal and diseased heart, they supplement diagnostic cardiology reports, are used in planning or performing endovascular and surgical interventions. Digital models can be imported into mixed reality devices and thus used for navigation during surgical and endovascular interventions.

Conclusion. Novel three-dimensional technologies have made progress in education, teaching, scientific study of heart anatomy, as well as diagnosis and treatment of a wide range of diseases of the cardiovascular system. Digital images, as opposed to traditional

drawings, are interactive and can be viewed both on a computer and with extended reality devices. The use of the novel heart imaging modalities deepens the understanding of the fundamental anatomy, facilitates basic education, makes the diagnostic conclusions more descriptive, and contributes to the more accurate performance of interventions. The positive results of the implementations of these technologies justify and stipulate their further utilization.

Keywords: augmented reality, virtual reality, mixed reality, heart segmentation, three-dimensional model, heart anatomy.

Corresponding author: Vitaliy Petrov, Department of Surgery and Transplantology, Danylo Halytsky National Medical University, Lviv, Ukraine
e-mail: vtly.12@gmail.com

РЕЗЮМЕ

Віталій Петров

<https://orcid.org/0000-0002-2205-5403>

Кафедра хірургії та трансплантології, Львівський національний медичний університет ім. Данила Галицького, м. Львів, Україна

Мар'яна Паньків

<https://orcid.org/0000-0002-3714-2577>

Кафедра хірургії, Львівська медична академія імені Андрея Крушинського, м. Львів, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ТРИВИМІРНИХ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ВІДОБРАЖЕННЯ БУДОВИ СЕРЦЯ

Вступ. Із-за багатокомпонентної об'ємної будови серця, повноцінно відобразити цей орган традиційними рисунками є складним завданням. Тому для зображення анатомії серця виникла необхідність у застосуванні тривимірних моделей, відповідні цифрові технології для яких стали доступними в останні десятиліття.

Матеріал і методи. З бази MEDLINE відібрано статті, які відображають ключові етапи виникнення тривимірних цифрових технологій візуалізації анатомії серця і області їх медичного впровадження.

Результати. Тривимірні реконструкції серця створюють методом сегментації з результатів променевих обстежень (комп'ютерна томографія, магнітно-резонансна томографія, ультразвукова діагностика). Створені моделі відтворюють анатомію серцево-судинної системи *in vivo*. Цифрові моделі володіють інтерактивністю, дозволяють досліджувати зовнішню форму та внутрішню будову. Зображення можна переглянути на екрані комп'ютера або стереоскопічно, користуючись гарнітурою віртуальної реальності та смарт-окулярами, моделі можна повернути під будь-яким кутом, “зануритись” в них чи розділити на частини. Над реконструкціями можна проводити повторні маніпуляції, що неможливі зі справжніми органами (віртуальний розтин). Нові засоби знайшли застосування в навчанні і викладанні анатомії, фундаментальних дослідженнях будови нормального і патологічно зміненого серця, вони доповнюють діагностичні кардіологічні звіти, використовуються при плануванні або виконанні ендovasкулярних та хірургічних втручань. Цифрові моделі можуть бути імпортовані в пристрої змішаної реальності і в такий спосіб використовуватись для навігації під час хірургічних та ендovasкулярних втручань.

Висновки. Нові тривимірні технології здійснили поступ у навчанні, викладанні, науковому вивченні анатомії серця, а також діагностиці та лікуванні широкого спектру захворювань серцево-судинної системи. Цифрові зображення, на відміну від традиційних рисунків, є інтерактивними, при цьому їх можна переглядати як на комп'ютері, так і пристроями розширеної

реальності. Застосування нових засобів відображення серця поглиблює розуміння фундаментальної анатомії, полегшує її вивчення, робить діагностичні висновки більш показовими, сприяє точнішому виконанню втручань. Позитивні результати впровадження цих технологій обґрунтовують і обумовлюють їх подальше поширення.

Ключові слова: розширена реальність, віртуальна реальність, змішана реальність, сегментація серця, тривимірна модель, анатомія серця.

Автор, відповідальний за листування: Віталій Петров, кафедра хірургії та трансплантології, Львівський національний медичний університет ім. Данила Галицького, м. Львів, Україна
e-mail: vtly.12@gmail.com

INTRODUCTION / ВСТУП

Необхідність застосування тривимірних моделей під час відображення анатомії серця виникла із-за його багатокомпонентної об'ємної будови. В даному огляді літератури розглянуто ключові етапи виникнення таких технологій, їх основні види і напрями застосування.

Матеріал і методи. З бази MEDLINE відібрано статті, які відображають ключові етапи виникнення тривимірних цифрових технологій візуалізація анатомії серця і області їх медичного впровадження.

Результати

Етапи становлення тривимірних технологій відображення будови серця

Після завершення періоду заборон Середньовіччя, анатоми доби Відродження почали проводити розтини людських трупів, що дозволило зробити важливі відкриття про будову і роботу організму, та врешті започаткувало сучасну медицину і анатомію. Свої спостереження дослідники замальовували в рисунках, для виконання яких все частіше застосовувались нові на той час прийоми графічного створення об'єму. Особливу увагу слід приділити Андреасу Везалію (XVI ст.), який створив атлас анатомії високої якості, тим самим започаткував традицію і водночас встановив вимогу якнайбільшої реалістичності зображень [1]. Відтоді в рисунках анатомію відтворюють із строгим додержанням пропорцій та форми, а в найбільш якісному їх виконанні – показуючи поверхню з ефектом освітлення і відчуттям перспективи та глибини. Ці графічні засоби дозволяють певною мірою отримати розуміння про тривимірну (об'ємну) будову органів навіть попри те, що рисунок створений на двовимірній площині (папері) [2]. Подібні рисунки до сьогодні залишаються основним способом

передачі візуальної інформації про анатомію людини.

Тим не менше, повноцінно відтворити об'ємну будову органів рисунками непросто. Труднощі полягають перш за все у тому, що читач вимушений провести складну роботу, а саме: із двовимірних рисунків у власній уяві потрібно створити тривимірний образ. Крім того, досліднику належить ментально зіставити зовнішню форму з внутрішньою будовою органу [3]. Тому для поглибленого вивчення анатомії органів, в тому числі серця, очевидною є потреба в огляді справжніх препаратів. Поряд з традиційними дослідженнями матеріалів розтину і їх збереженням в формалінових розчинах, у XVII–XX ст. запропоновано декілька інших способів вирішення цієї проблеми.

Ряд анатомів XVII–XIX ст. створили воскові моделі нормального серця та його аномалій. Воскові моделі виготовляли із зліпків сердець, вони володіли високою точністю та якістю мистецького виконання. Деякі моделі збереглись до сьогодні в музеях Європи та США [4]. В середині XX ст. анатом D. Bassett і винахідник W. Gruber в університеті Стенфорда (США) провели кольорове стерео фотографування різних етапів розтину та препарування і в такий спосіб створили стереоскопічний атлас анатомії людини. Сьогодні тривимірні моделі цього атласу можна роздивитись як у стереоскопі, так і на екрані телевізора чи проектора через сучасні анагліфічні стерео окуляри [5].

Незважаючи на високу якість і мистецьку цінність класичних атласів, зображення представляють собою статичні малюнки, з них не завжди можна повноцінно зрозуміти форму органів. В той же час, воскові та стереоскопічні моделі не є широко доступні. Таким чином, потреба в тривимірних моделях залишається

актуальною проблемою, до вирішення якої дослідники підійшли лише нещодавно [6].

Технології комп'ютерної тривимірної графіки, які виникли наприкінці ХХ ст., дозволили будувати моделі складної форми, в тому числі серця. Потрібно відмітити, що новий вид зображень створювався не на основі справжніх органів, як у випадку воскових моделей чи стереоскопічних фотографій, а був цілком нарисований комп'ютерною програмою, тобто вироблений *de novo* [7, 8]. Тривимірною цифрою реконструкція справжнього серця і інших органів стала можливою після завершення проекту Visible Human Project (VHP).

Перший етап VHP розпочатий наприкінці 1980-х р.р. з пропозиції інженера М. Askerman керівництву Національної бібліотеки з медицини (США) створити цифрову тривимірну модель тіла та органів людини. Така модель, на думку М. Askerman, могла б допомогти студентам-медикам краще вивчити анатомію людини. В результаті обговорень було вирішено виконати високоякісні КТ (товщина зрізу 1 мм) і МРТ (товщина зрізу 4 мм) трупів чоловіка і жінки та зберегти їх в цифровому форматі. Крім того, було заплановано провести відповідні до аксіальних сканувань томографа пошарові розтини тіл, від голови до стоп, з дуже малим кроком між розрізами (0,33–1 мм), сфотографувати всі шари і оцифрувати фотографії. Це забезпечило можливість порівняти картини томографій зі справжнім розтином і в такий спосіб забезпечити достовірність реконструкцій [5, 8].

Для проекту взято тіло засудженого до смерті 39-річного чоловіка, який перед стратою погодився на наукове дослідження, і тіло 59-річної жінки, дозвіл на участь якої надав її чоловік. Вся робота виконана в університеті Колорадо (США), дані чоловіка були готові в 1994 р., а жінки в 1995 р. [5]. Результати доступні на сайті Національної бібліотеки з медицини безкоштовно (https://www.nlm.nih.gov/research/visible/getting_data.html).

З отриманого цифрового матеріалу були створені тривимірні моделі тіл та органів для перегляду на моніторі комп'ютера. Моделі можна було повернути під будь-яким кутом, “зануритись” в них чи розділити на частини. Відкрилась нова ера вивчення, викладання і наукового дослідження анатомії людини, яка базувалась на об'ємних моделях, а не лише на

традиційних рисунках [8]. Необхідно звернути увагу на те, що тривимірні моделі створювались з цифрової бази даних вручну (встановлення належності кожної точки площинного зрізу певному органу і “збирання” органу з цих точок носить назву сегментації), що було коштовною і довгою процедурою. Тому невдовзі М. Askerman висунув пропозицію продовжити проект і виготовити програмне забезпечення для сегментації цифрових даних комп'ютером [5, 8].

Другий етап VHP тривав з 1999 р. по 2002 р. Національна бібліотека з медицини надала грант шістьом підрядникам (комерційні компанії і університети США) для вироблення необхідної комп'ютерної платформи. В результаті створено Insight Segmentation and Registration Toolkit (більш відома як ІТК), що виконує сегментацію цифрових даних. Платформа ІТК була надана для безкоштовного користування, тому її невдовзі впровадили у роботу усі виробники томографів та іншої діагностичної апаратури [5].

Завдяки ІТК і наступним її удосконаленням, застосування тривимірних реконструкцій перетворилось на повсюдну медичну практику. Лікарі практично всіх галузей отримали можливість створювати тривимірні картини серця та інших органів кожного пацієнта з результатів його КТ, МРТ або УЗД. У відповідних комп'ютерних програмах з'явилась можливість зануритись всередину органу (“віртуальна ендоскопія”), використати тривимірну модель для навігації і помістити в нього медичний імплант (“віртуальна хірургія”), підрахувати об'єм серця чи його камери до і після віртуального втручання. Весь орган або його частину можна позначити, “витягнути” з тіла, оглянути під будь-яким кутом, “повернути” в анатомічну позицію (“віртуальний розтин”) [9–11].

Основні види сучасних цифрових технологій

Треба визнати, що перегляд комп'ютерних об'ємних моделей залишає дослідника з вихідною проблемою – тривимірні об'єкти відтворюються у двовимірній площині (щоправда, на відміну від паперу, у даному випадку мова йде про екран). Вихід за межі двовимірних екранів стався відносно нещодавно, завдяки тому, що пристрої розширеної реальності стали компактними і доступними.

Розширена реальність – це збірне поняття, яке охоплює віртуальну, підсилену та змішану реальності [12]. У віртуальній реальності користувач застосовує наголовний шолом, крізь

який не видно навколишнього світу (HTC Vive, Oculus Rift і ін.). Натомість, два екрани показують кожному оку рисунком одного і того ж предмету, в такий спосіб користувач бачить об'єкт стереоскопічно у віртуальному просторі (Рис. 1).

У підсиленій та змішаній реальності користувач розглядає світ через прозорі смарт-

окуляри (Microsoft HoloLens, Sony SmartEyeglass і ін.). Мікропроектори, вбудовані в смарт-окуляри, спрямовують у зіниці картини моделі і в такий спосіб користувач бачить навколишній світ і реалістично доданий до нього тривимірний об'єкт.

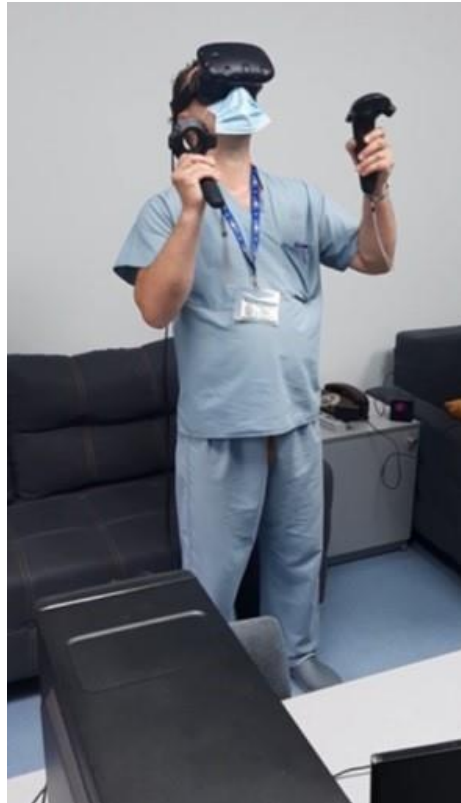


Рисунок 1 – Користувач розглядає віртуальний об'єкт, користуючись гарнітурою віртуальної реальності

Пристрої засобів розширеної реальності забезпечили стереоскопічний огляд серця і його структур. Користувач може оглянути серце ззовні або “зануритись” всередину, обійти його, а користуючись контролерами – наблизити чи збільшити орган. Такі інтерактивні можливості не лише створюють позитивний емоційний фон, але полегшують просторове сприйняття будови і тому сприяють запам'ятовуванню [13, 14]. Можна виділити три напрями застосування цифрових технологій, де отримано позитивні результати, – в дослідженні фундаментальної анатомії, у навчанні та в медичній практиці.

Роль в дослідженні фундаментальної анатомії

Із-за наповнення кров'ю і механічної роботи, форма серця в живому організмі суттєво

відрізняється від порожнього посмертного вигляду. Крім того, під час розтину серце надрізається, тому частина структур неодмінно руйнується. Природня форма у препараті спотворена і через те, що для наочності показу серце іноді розтягують в неприродній спосіб [3,13]. На противагу класичному розтину, віртуальний розтин дозволяє вивчити анатомію *in vivo*.

Під час віртуального розтину дослідник виділяє серцево-судинний комплекс з грудної клітки без пошкоджень, проводить довільну кількість розрізів, в траєкторіях, які неможливі під час роботи зі справжнім тілом, зберігає дані і надає їх колегам (Рис. 2а-в). На Рис. 2 подано віртуальний розтин дуги аорти і стовбура легеневої артерії. Загальний вигляд комплексу

збоку (Рис. 2а) і зверху (Рис. 2б) показує, що легеневий стовбур прямує до дуги аорти не вертикально, а під кутом до горизонталі. Проведений довільний розріз (жовтий контур Рис. 2б) привів до препарату (Рис. 2в), який був би неможливим під час звичайного розтину. Препарат Рис. 2с показує, як ліва легенева артерія співвідноситься з дистальним відділом

дуги і початковим відділом низхідної аорти. Ця синтопія має вкрай важливе клінічне значення – в анатомічно сприятливих випадках в показану ділянку лікарі встановлюють стент, який сполучає просвіт лівої легеневої артерії та низхідної аорти і, таким чином, надають допомогу пацієнтам з важкою ідіопатичною легеневою гіпертензією [15].

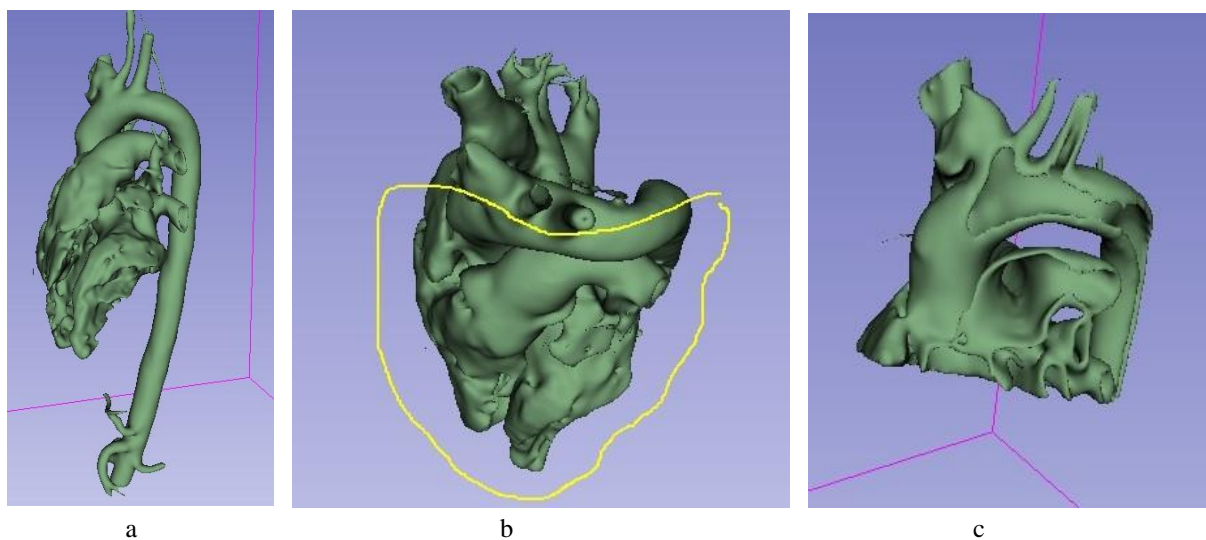


Рисунок 2 – Віртуальний розтин серцево-судинного комплексу, а – тривимірна модель, б – траєкторія розтину (вигляд зверху), в – просвіт дуги аорти, лівої сонної артерії і біфуркації легеневого стовбура на розтині

Застосовуючи метод віртуального розтину, дослідниками створено високоякісні тривимірні реконструкції серця в грудній клітці, а також окремих його структур (пересердя і шлуночки, перегородки, магістральні артерії, передсердно-шлуночкові і шлуночково-артеріальні клапани, коронарні артерії та вени, провідна система). Це дозволило візуалізувати прижиттєву будову органу і шляхом аналізу об’ємних моделей глибше дослідити топографічну анатомію [3, 11, 16]. Деякі знахідки здатні кардинально змінити усталені підходи.

Історичні терміни “праві та ліві передсердя і шлуночки”, як показано, не є коректними, оскільки праві камери *in vivo* розміщені не стільки справа, як спереду (вентрально, ретростернально), а ліві камери – не зліва, а позаду (дорсально, превертебрально) [3, 11]. Віртуальний розтин провідної системи серця виявив, що дистальні волокна пучка Гіса проходять уздовж передньо-нижнього краю мембранозної частини міжшлуночкової перегородки, а не по його

нижньому краю, як вважалося раніше [16]. Традиційне розуміння терміну “передня стінка лівого шлуночка” не відповідає анатомічним критеріям, оскільки спереду лівий шлуночок представлений міжшлуночковою перегородкою. Поверхня лівого шлуночка, яку прийнято називати передньою, насправді є верхньою, а відтак “передня міжшлуночкова гілка лівої коронарної артерії” також є верхньою. Продовжуючи розглядати просторову анатомію, дослідники виявили, що “задня низхідна” коронарна артерія насправді є нижньою, водночас не маючи “низхідного” характеру проходження по нижньому краю міжшлуночкової перегородки [3]. Нові дані можуть бути суттєвими для медичної спільноти, оскільки термін “передньо-перегородковий інфаркт міокарда” може бути змінений на “верхньо-перегородковий”, а “задній інфаркт міокарда” – на “нижній”.

Роль в навчальному процесі

На основі застосунків віртуального розтину створені і активно використовуються тривимірні

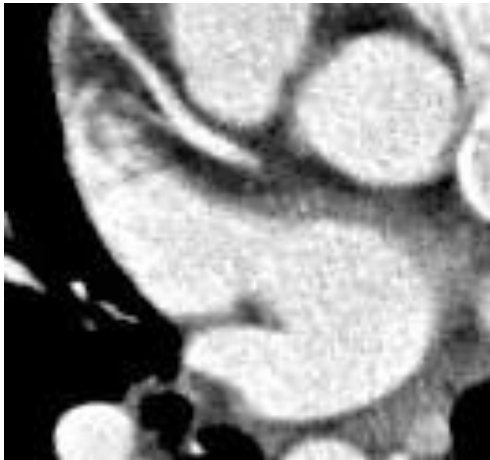
атласи інтерактивної анатомії Netter3DAnatomy, Anatomage, Visible Body і ін. Атласи нового покоління представляються собою цифрові додатки для комп'ютерів, планшетів і смартфонів, в яких користувач оглядає тіло та органи, "розділяє" їх, пошарово занурюється в деталі будови і водночас має можливість довільно обертати моделі. Такі посібники більше зацікавлюють студентів та резидентів до навчання, ніж звичайні атласи анатомії, і покращують їх показники засвоєння академічного матеріалу [1, 9]. Згідно результатів Casallas & Quijano (2018), студенти, які вивчали анатомію серця з тривимірними моделями, отримали середню оцінку за курс 4,3 (по п'ятибальній шкалі оцінювання), тоді як студенти, які навчалися без них, отримали середній бал 3,6 [17].

Навчальні засоби не обмежуються інтерактивними атласами і можуть застосовувати пристрої віртуальної реальності. У цих програмах користувач бачить модель серця стереоскопічно, перебуваючи у віртуальному

оточенні (Рис. 1). Нещодавні дослідження показали вищу, у порівнянні з традиційними навчальними методами, ефективність вивчення будови серця студентами-медиками, резидентами, медичними сестрами, а також лікарями підвищення кваліфікації [13, 14]. Показовими є результати дослідження Maresky et al. (2019): студенти, які вивчали анатомію серця через віртуальну реальність, в тестовому контролі зробили на 21% менше помилок в питаннях базової анатомії і на 26% в питаннях синтопії, ніж ті учасники, які не користувались технологіями тривимірної візуалізації [13].

Роль у медичній практиці

Результати томографії та ультразвукового обстеження серця у вигляді двовимірних зрізів, попри свою інформативність, не завжди задовольняють анатомів, діагностів, кардіологів та хірургів, оскільки залишають можливість неоднозначної інтерпретації різними лікарями. На противагу двовимірним зрізам, тривимірна модель надає необхідну візуальну інформацію в більш об'єктивному вигляді (Рис. 3).



а



б

Рисунок 3 – Двовимірний зріз і тривимірна модель вушка лівого передсердя: а – аксіальний зріз КТ, б – тривимірна реконструкція, створена з аксіальних зрізів

З аксіального зрізу на Рис. 3а залишається незрозумілою будова вушка лівого передсердя. В той же час, тривимірна реконструкція вушка лівого передсердя на Рис. 3б показує принципові особливості його форми: відносно вузька основа (є меншою, ніж довжина), продовгувата форма тіла, два згини і спрямований вгору кінець. Це спостереження однаково доступне усім спостерігачам, незалежно від ступеня їх кваліфікації і досвіду.

Zhang et al. (2018) показано, що тривимірна реконструкція будови вушка лівого передсердя з доопераційною оцінкою його форми і розмірів дозволяє швидше обрати відповідний пристрій для його ендovasкулярного закриття, а це зменшує тривалість операційного втручання [18].

Користуючись відповідними приладами, кардіологи, аритмологи і хірурги, отримують можливість стереоскопічно розглянути моделі

серця та оцінити деталі будови клапанів, камер, перегородок, магістральних та коронарних судин. Нові засоби оцінки патологічно зміненої анатомії серця виявились більш прецензійним способом вибору тактики лікування, ніж традиційний огляд ехокардіограм чи томографій, дозволили точніше описати анатомічні зміни, створити повноцінне тривимірне розуміння вади і на цій підставі скласти план хірургічного втручання, а саму операцію виконати швидше [19–22]. Особливий інтерес викликають публікації із результатами інтраопераційного застосування смарт-окулярів (технологія змішаної реальності). Дивлячись на пацієнта крізь ці окуляри, хірург водночас бачить віртуальне зображення серця та судин, які точно відповідають їх топографії. В такий спосіб, лікар отримує цінну інформацію для навігації під час

виконання хірургічної чи ендovasкулярної процедури, а тому дії рук стають точнішими і ризику помилок зменшуються [23–27].

Віртуальний розтин можна проводити як на моделях прижиттєвого обстеження, так і посмертних томографіях (зауважимо, що таким був сценарій проекту VHP). Провівши віртуальний розтин, патологоанатом або судово-медичний експерт отримує можливість зробити висновок про причини смерті та прийняти рішення про необхідність секційного дослідження. Дослідження показали, що віртуальний розтин може точно встановити механізм раптової серцевої смерті. Крім того, у випадках насильницької смерті, тривимірні реконструкції раневого каналу та стороннього тіла можуть стати неоціненними для судово-медичної експертизи [10, 28, 29].

CONCLUSIONS / ВИСНОВКИ

Нові тривимірні технології здійснили поступ у медичних галузях, що потребують візуалізації серця. Цифрові зображення, на відміну від традиційних рисунків, є інтерактивними, при цьому їх можна переглядати як на комп'ютері, так і пристроями розширеної реальності. Методика віртуального розтину надає можливість оцінити розташування та будову серця в просторі, що дозволяє поглиблено

дослідити його фундаментальну анатомію. Нові засоби відображення полегшують вивчення і покращують результати викладання анатомії серця. Тривимірні технології роблять діагностичні висновки наочними та більш показовими, а їх застосування для перед- та інтраопераційної навігації забезпечують швидше виконання втручань з більшою точністю. Позитивні результати впровадження цих технологій обґрунтовують і обумовлюють їх подальше поширення.

CONFLICT OF INTEREST / КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

FUNDING / ДЖЕРЕЛА ФІНАНСУВАННЯ

Відсутні.

AUTHOR CONTRIBUTIONS / ВКЛАД АВТОРІВ

Усі автори зробили істотний внесок у розробку початкової та доопрацьованої версії цієї статті. Вони несуть повну відповідальність за всі аспекти роботи і вирішення питань, пов'язаних з точністю або цілісністю наведеної інформації.

REFERENCES/СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Bisht B, Hope A, Paul MK. From papyrus leaves to bioprinting and virtual reality: history and innovation in anatomy. *Anat Cell Biol.* 2019;52:226. <https://doi.org/10.5115/ACB.18.213>.
2. Oliver C. *Anatomy and perspective: the fundamentals of figure drawing.* Dover Publications; 2004.
3. Mori S, Tretter JT, Spicer DE, Bolender DL, Anderson RH. What is the real cardiac anatomy? *Clin Anat.* 2019;32:288–309. <https://doi.org/10.1002/CA.23340>.
4. de Gouveia RH, Santi R, Ballestriero R, Galassi FM, Carvalho L, Nesi G. Wax hearts: seeking the antiquity of cardiac pathology. *Pol J Pathol.* 2021;72:346–52. <https://doi.org/10.5114/PJP.2021.114182>.
5. Ackerman MJ. The visible human project®: from body to bits. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc.* 2016:3338–41. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2016.7591442>.
6. Rifkin BA, Ackerman MJ, Folkenberg Judy. Human anatomy: depicting the body from the Renaissance to

- today. Thames & Hudson; 2006.
7. Stanford W, Erkonen WE, Cassell MD, Moran BD, Easley G, Carris RL, et al. Evaluation of a computer-based program for teaching cardiac anatomy. *Invest Radiol.* 1994;29:248–52. <https://doi.org/10.1097/00004424-199402000-00022>.
 8. Erolin C. Interactive 3D digital models for anatomy and medical education. *Adv Exp Med Biol.* 2019;1138:1–16. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14227-8_1.
 9. Raja B, Chandra A, Azam MQ, Das S, Agarwal A. Anatomage - the virtual dissection tool and its uses: A narrative review. *J Postgrad Med.* 2022;68:156–61. https://doi.org/10.4103/JPGM.JPGM_1210_21.
 10. Kalladan A, Sharma S, Scholar PG. A review article on the pros and cons of virtual dissection versus cadaveric dissection. *International Ayurvedic Medical Journal.* 2022:106–10. <https://doi.org/10.46607/iamj1610012022>.
 11. Tretter JT, Gupta SK, Izawa Y, Nishii T, Mori S. Virtual Dissection: Emerging as the Gold Standard of Analyzing Living Heart Anatomy. *J Cardiovasc Dev Dis.* 2020;7. <https://doi.org/10.3390/JCDD7030030>.
 12. Lungu AJ, Swinkels W, Claesen L, Tu P, Egger J, Chen X. A review on the applications of virtual reality, augmented reality and mixed reality in surgical simulation: an extension to different kinds of surgery. *Expert Rev Med Devices.* 2021;18:47–62. <https://doi.org/10.1080/17434440.2021.1860750>
 13. Maresky HS, Oikonomou A, Ali I, Ditkofsky N, Pakkal M, Ballyk B. Virtual reality and cardiac anatomy: Exploring immersive three-dimensional cardiac imaging, a pilot study in undergraduate medical anatomy education. *Clin Anat.* 2019;32:238–43. <https://doi.org/10.1002/CA.23292>.
 14. Bouraghi H, Mohammadpour A, Khodaveisi T, Ghazisaeedi M, Saeeedi S, Familgarosian S. Virtual Reality and Cardiac Diseases: A Systematic Review of Applications and Effects. *J Healthc Eng.* 2023;2023:8171057. <https://doi.org/10.1155/2023/8171057>.
 15. Guo K, Langleben D, Afilalo J, Shimony A, Leask R, Marelli A, et al. Anatomical considerations for the development of a new transcatheter aortopulmonary shunt device in patients with severe pulmonary arterial hypertension. *Pulm Circ.* 2013;3:639. <https://doi.org/10.1086/674328>.
 16. Kawashima T, Sato F. First in situ 3D visualization of the human cardiac conduction system and its transformation associated with heart contour and inclination. *Sci Rep.* 2021;11. <https://doi.org/10.1038/S41598-021-88109-7>.
 17. Casallas A, Quijano Y. 3D rendering as a tool for cardiac anatomy learning in medical students. *Revista Facultad de Medicina* 2018;66:611–6. <https://doi.org/10.15446/REVFACMED.V66N4.65573>
 18. Zhang K, Zhou J, Zhang T, Zhang Z, Jin S, He Q, et al. Comparison of multiple imaging modalities for measuring orifice diameter and selecting occluder size in patients undergoing left atrial appendage closure. *Clin Cardiol.* 2022;45:864. <https://doi.org/10.1002/CLC.23869>.
 19. Pisowodzka IK, Gründeman PF, Meijboom F, van Aarnhem G, Meijer R, Cramer MJ, et al. Added Value of Interactive 3-D Stereo Vision Echocardiography in the Heart Valve Team: A Post Hoc Analysis for Optimal Decision Making in Patients With Mitral Valve Regurgitation. *Innovations (Phila).* 2020;15:36–42. <https://doi.org/10.1177/1556984519887973>.
 20. Mendez A, Hussain T, Hosseinpour AR, Valverde I. Virtual reality for preoperative planning in large ventricular septal defects. *Eur Heart J.* 2019;40:1092. <https://doi.org/10.1093/EURHEARTJ/EHY685>
 21. Narang A, Hitschrich N, Mor-Avi V, Schreckenberger M, Schummers G, Tiemann K, et al. Virtual reality analysis of three-dimensional echocardiographic and cardiac computed tomographic data sets. *Journal of the American Society of Echocardiography.*2020;33:1306–15. <https://doi.org/10.1016/J.ECHO.2020.06.018>.
 22. Ye W, Zhang X, Li T, Luo C, Yang L. Mixed-reality hologram for diagnosis and surgical planning of double outlet of the right ventricle: a pilot study. *Clin Radiol.* 2021;76:237.e1-237.e7. <https://doi.org/10.1016/J.CRAD.2020.10.017>.
 23. Opolski MP, Debski A, Borucki BA, Szpak M, Staruch AD, Kepka C, et al. First-in-Man Computed Tomography-Guided Percutaneous Revascularization of Coronary Chronic Total Occlusion Using a Wearable Computer: *Proof of Concept.* *Can J Cardiol.* 2016;32:829.e11-829.e13. <https://doi.org/10.1016/J.CJCA.2015.08.009>.
 24. Witowski J, Darocha S, Kownacki Ł, Pietrasik A, Pietura R, Banaszkiewicz M, et al. Augmented reality and three-dimensional printing in percutaneous interventions on pulmonary arteries. *Quant Imaging Med Surg.* 2019;9:23. <https://doi.org/10.21037/QIMS.2018.09.08>.
 25. Cen J, Liufu R, Wen S, Qiu H, Liu X, Chen X, et al. Three-Dimensional Printing, Virtual Reality and Mixed Reality for Pulmonary Atresia: Early Surgical Outcomes Evaluation. *Heart Lung Circ.* 2021;30:296–302. <https://doi.org/10.1016/J.HLC.2020.03.017>.
 26. Zhu H, Li Y, Wang C, Li QY, Xu ZY, Li X, et al. A first attempt of inferior vena cava filter successfully guided by a mixed-reality system: a case report. *J Geriatr Cardiol.* 2019;16:575–7. <https://doi.org/10.11909/J.ISSN.1671-5411.2019.07.008>.
 27. Balzer J, Zeus T, Hellhammer K, Veulemans V, Eschenhagen S, Kehmeier E, et al. Initial clinical experience using the EchoNavigator®-system during structural heart disease interventions. *World J Cardiol.* 2015;7:562. <https://doi.org/10.4330/WJC.V7.I9.562>.
 28. Ross SG, Thali MJ, Bolliger S, Germerott T, Ruder TD, Flach PM. Sudden death after chest pain:

feasibility of virtual autopsy with postmortem CT angiography and biopsy. *Radiology*. 2012;264:250–9. <https://doi.org/10.1148/RADIOL.12092415>

29. Michaud K, Genet P, Sabatasso S, Grabherr S. Postmortem imaging as a complementary tool for the

investigation of cardiac death. *Forensic Sci Res*. 2019;4:211. <https://doi.org/10.1080/20961790.2019.1630944>

Received 22.11.2023

Accepted 27.12.2023

Одержано 22.11.2023

Затверджено до друку 27.12.2023

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Петров Віталій Федорович, PhD, асистент кафедри хірургії та трансплантології, Львівський національний медичний університет ім. Данила Галицького, orcid.org/0000-0002-2205-5403

79010, вул. Пекарська 69, м. Львів

vtly.12@gmail.com

Паньків Мар'яна Володимирівна, PhD, асистент кафедри хірургії, Львівська медична академія імені Андрея Крупинського, orcid.org/0000-0002-3714-2577

79000, вул. Петра Дорошенка 70, м. Львів

maruana2008@gmail.com