

УДК 615.47

АНДРІЙ СОКОЛЬЦОВ, ІГОР КАНДАУРОВ, БОГДАН ПРИВАЛОВ, ТЕТЯНА НОСОВА,
НАТАЛІЯ ШУШЛЯПІНА, ЯНА НОСОВА, ЛІЛІЯ АВЕР'ЯНОВА, ОЛЕГ АВРУНІН

НАТУРНІ 3D –МОДЕЛІ ЯК ЕФЕКТИВНИЙ ІНСТРУМЕНТ ДЛЯ ВІДПРАЦЮВАННЯ НАВИЧОК РИНОЕНДОСКОПІЧНИХ ВТРУЧАНЬ

*Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна,
e-mail: andrii.sokolov@nure.ua, oleg.avrunin@nure.ua*

*Харківський національний медичний університет, Харків, Україна, e-mail:
no.shushliapina@kntu.edu.ua*

Анотація. У статті представлено підхід до створення та використання натурних 3D-друкованих анатомічних моделей для відпрацювання навичок риноендоскопічних втручань. Описано методику отримання та сегментації томографічних даних, формування позрізових моделей та їх подальше прототипування засобами адитивних технологій. Особливу увагу приділено оцінці ефективності моделей у навчальному процесі, включно з можливістю об'єктивного вимірювання хірургічних навичок за допомогою стандартизованих методик на кшталт OSATS. Наведено результати досліджень, які підтверджують зменшення часу виконання процедур, підвищення точності маніпуляцій та зростання рівня підготовленості лікарів-отоларингологів. Обговорюються переваги персоніфікованих 3D-моделей, їх роль у симуляційному навчанні та перспективи впровадження у клінічну практику.

Ключові слова: 3D-друк, анатомічні моделі, риноендоскопія, симуляційне навчання, сегментація томографічних зображень, хірургічні навички, функціональна ендоскопічна хірургія пазух.

Abstract. The article presents an approach to developing and applying realistic 3D-printed anatomical models for training skills in rhinoendoscopic procedures. The methodology for acquiring and segmenting tomographic data, generating slice-based models, and fabricating them using additive technologies is described. Special attention is given to evaluating the effectiveness of the models in surgical training, including the ability to objectively assess technical performance using standardized tools such as OSATS. The results demonstrate reduced procedure time, improved accuracy of manipulations, and increased preparedness among otolaryngology trainees. The advantages of personalized 3D models, their role in simulation-based education, and future prospects for their integration into clinical practice are discussed.

Keywords: 3D printing, anatomical models, rhinoendoscopy, simulation-based training, CT segmentation, OSATS, surgical skills, functional endoscopic sinus surgery.

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-50-2-233-243

1. ВСТУП

Ендоскопічні операції на навколоносових пазухах і основі черепа охоплюють ділянки зі складною анатомією та потребують від хірурга надзвичайної точності дій у вузькому оперативному полі. Виконання таких малоінвазивних втручань вимагає впевненої бімануальної роботи в обмеженому тривимірному просторі та одночасного уникнення ушкодження життєво важливих структур – зокрема, очної орбіти, головного мозку та гілок внутрішньої сонної артерії [1, 2]. Для досягнення безпечних і стабільних результатів необхідні не лише ґрунтовні знання анатомії, а й систематичне навчання, практичні тренування й опанування відповідних технік. Хірургічна підготовка є ключовою умовою формування професійних умінь, що забезпечують високий рівень лікування пацієнтів. Поряд із вивченням спеціалізованої літератури та участю в операційних спостереженнях, курси хірургічних навичок становлять основу підготовки майбутніх фахівців.

Традиційно становлення професійних компетентностей відбувалося через поступове занурення ординаторів у практику: від ролі спостерігача – до самостійного виконання процедур під наглядом досвідченого хірурга. Цей підхід, сформульований Вільямом Холстедом наприкінці XIX століття як принцип «подивись раз, зроби раз, навчи раз», тривалий час залишався стандартом підготовки хірургів [3]. Нині ж розвиток комп'ютерних технологій і швидкого прототипування відкриває можливості створювати віртуальні та фізичні моделі для оволодіння навичками сучасної медичної ендоскопії.

2. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

Сучасні ендоскопи характеризуються низкою ключових конструктивних і оптичних параметрів (рис. 1), серед яких основними є діаметр D та довжина L робочої частини, кут огляду α та кутове поле зору ω . Діаметр визначає можливість доступу до анатомічно вузьких зон та ступінь інвазивності втручання, тоді як довжина ендоскопа впливає на досяжність глибоко розташованих структур. Кут огляду α задає напрямок, під яким хірург може візуалізувати операційне поле (наприклад, 0° , 30° , 45° , 70°), тоді як поле зору ω визначає ширину простору, який оптика здатна охопити за один погляд, впливаючи на орієнтацію в складних анатомічних умовах. Сукупність цих параметрів дає змогу оцінити ергономічність інструмента, точність маніпуляцій та потенціал для роботи у глибоких і звивистих ділянках операційної зони.

Навчання безпосередньо на пацієнтах у межах клінічного процесу, попри свою традиційність, супроводжується підвищеним рівнем ризику. Воно створює додаткове навантаження на пацієнта та може збільшувати імовірність ускладнень, особливо під час перших самостійних маніпуляцій молодих хірургів [3]. Саме тому в сучасній хірургічній освіті значну увагу приділяють симуляційним методам підготовки, використанню тренажерів, віртуальних симуляторів та натурних моделей, що дають можливість багаторазово відпрацьовувати техніку роботи з ендоскопом без ризику для здоров'я пацієнтів.

Схематичне зображення найбільш уживаних кутів огляду ендоскопів, які застосовуються в клінічній практиці (0° , 30° , 45° , 70° та ін.), наведено на рисунку 2. Такі ілюстрації дають змогу наочно продемонструвати принципи візуалізації та допомагають зрозуміти, які можливості забезпечує кожен тип оптики при доступі до різних анатомічних зон.

Складність спостереження анатомічної картини внутрішньоносових структур через ендоскоп можна оцінити, наприклад, за двома ендоскопічними зображеннями верхньощелепної пазухи з кутом огляду 0° та 30° , згідно з рисунками 3, а та 3, б, відповідно. З цих зображень можна усвідомити, що навігацію вздовж носової порожнини доцільно проводити ендоскопом з прямим оглядом, а детальніший огляд області співюстя та самої верхньощелепної пазухи та навколишніх анатомічних структур більш зручний при кутових напрямках огляду.

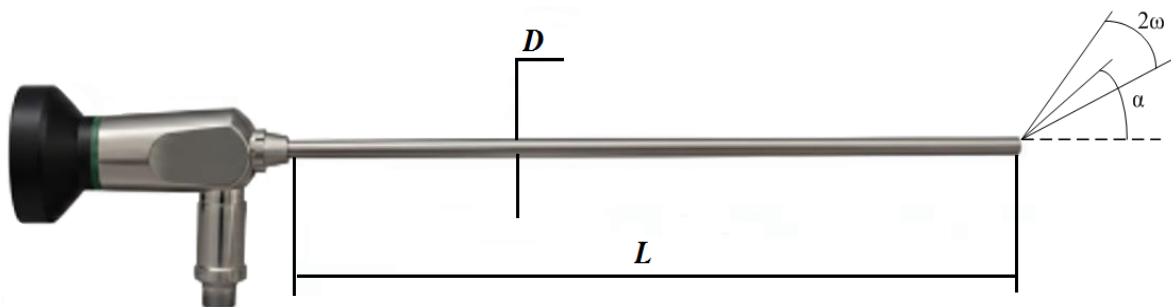


Рисунок 1 – Ілюстрація основних параметрів ендоскопу

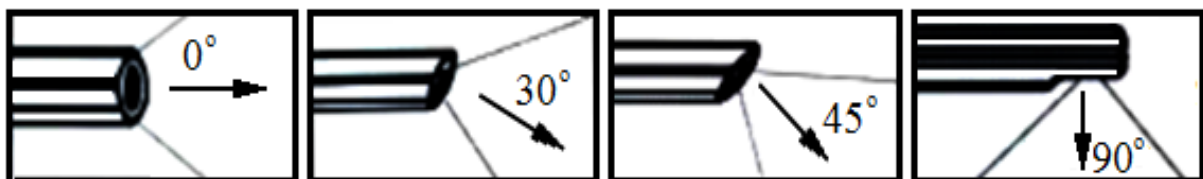


Рисунок 2 – Схематична ілюстрація деяких стандартних кутів огляду сучасних ендоскопів

Для навчання хірургів традиційно застосовують спеціалізовані курси та семінари, що передбачають роботу з трупним матеріалом. Наприклад, Штамбергер наголошував на необхідності виконання щонайменше десяти препарувань кадаврів перед початком самостійного проведення ендоскопічних операцій на навколоносових пазухах (FESS). Проте, незважаючи на значну освітню цінність такого підходу, робота з кадаверним матеріалом має низку вагомих недоліків: високу вартість, етичні та правові обмеження, а також потенційні біологічні ризики. Додаткові труднощі створюють індивідуальні анатомічні відмінності, наявність післяопераційних змін та непередбачувані особливості будови, що ускладнюють стандартизоване навчання і об'єктивну перевірку навичок. Через обмежену доступність трупного матеріалу та недостатню ефективність традиційних симуляційних засобів постала потреба у розробці більш доступних і водночас результативних тренажерних платформ для підготовки хірургів [3–6].

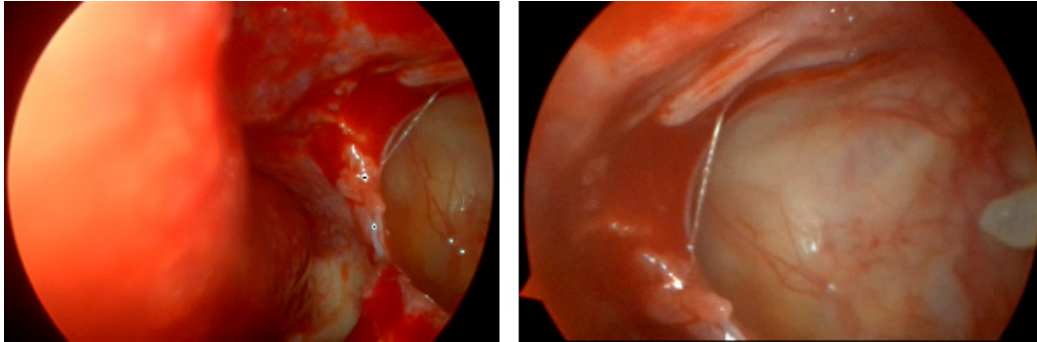


Рисунок 3 – Зображеннями верхньощелепної пазухи при ендоскопії з кутами огляду: а) 0°, б) 30°

Для навчання хірургів традиційно застосовують спеціалізовані курси та семінари, що передбачають роботу з трупним матеріалом. Наприклад, Штамбергер наголошував на необхідності виконання щонайменше десяти препарувань кадаврів перед початком самостійного проведення ендоскопічних операцій на навколоносових пазухах (FESS). Проте, незважаючи на значну освітню цінність такого підходу, робота з кадаверним матеріалом має низку вагомих недоліків: високу вартість, етичні та правові обмеження, а також потенційні біологічні ризики. Додаткові труднощі створюють індивідуальні анатомічні відмінності, наявність післяопераційних змін та непередбачувані особливості будови, що ускладнюють стандартизоване навчання і об'єктивну перевірку навичок. Через обмежену доступність трупного матеріалу та недостатню ефективність традиційних симуляційних засобів постала потреба у розробці більш доступних і водночас результативних тренажерних платформ для підготовки хірургів [3–6].

Зростання вимог до безпеки пацієнтів призвело до звуження можливостей традиційної хірургічної підготовки, що негативно вплинуло на обсяг практичних навичок, які здобувають майбутні хірурги згідно з усталеними принципами навчання. У таких умовах використання сучасних технологій тривимірного (3D) друку відкриває нові шляхи розвитку освітніх методик, зокрема через створення високоточних анатомічних моделей носових пазух на основі даних КТ. Це дозволяє відпрацьовувати хірургічні маніпуляції у середовищі, максимально наближеному до реальних умов, але без ризику для пацієнта [7].

Покращення властивостей матеріалів для 3D-друку підвищує реалістичність тактильних відчуттів під час роботи з такими моделями, що робить їх конкурентною альтернативою традиційним кадаверним зразкам. Важливою перевагою цих моделей є стабільна й передбачувана анатомічна будова, яка забезпечує однакові умови навчання для всіх учасників. Оскільки моделі не містять біологічних тканин, навчальні курси можуть проводитися поза межами спеціалізованих лабораторій, що значно спрощує їх організацію.

У наукових дослідженнях активно розглядаються різні варіанти створення тренувальних моделей для формування базових навичок ендоскопічної хірургії, серед яких 3D-надруковані моделі посідають провідне місце завдяки своїй безпечності, доступності та високій ефективності.

У межах пошуку альтернативних підходів до хірургічного навчання описано застосування різноманітних тренувальних моделей – від імітації операційного середовища за допомогою овочів (перців, томатів) і використання тканин тваринного походження (зокрема голів ягнят) як замінників людського кадаверного матеріалу, до 3D-надрукованих моделей та систем доповненої реальності. Кожен із цих варіантів має певні сильні сторони та недоліки, що обмежує їх можливість повністю замінити традиційні трупні препарати.

Абстрактні моделі на основі овочів продемонстрували ефективність у формуванні базових ендоскопічних навичок, таких як розвиток зорово-моторної координації, удосконалення точності рухів і уміння маневрувати інструментами у вузькому просторі. В опитуваннях 90% учасників таких тренувань відзначили зростання впевненості та визнали користь цих занять як початкового етапу перед виконанням маніпуляцій на трупному матеріалі та подальшим залученням до клінічної практики [8].

Тканини тварин, хоча й широко застосовуються в навчальному процесі, не завжди точно відтворюють анатомічні та функціональні особливості людських структур і специфіку реакції тканин на хірургічний вплив. Серед найбільш поширених зразків для тренування навичок ендоскопічної хірургії носових пазух вирізняється голова ягняти, анатомічна подібність якої до відповідних структур людини добре описана в літературі. Опрацювання технічних прийомів на такій моделі сприяє плавнішому та ефективнішому переходу до виконання процедур під наглядом досвідченого хірурга.

До ключових недоліків цієї моделі належать вимоги до спеціальних умов зберігання, потреба у попередній підготовці перед початком роботи, а також короткий період придатності – не більш ніж 4 години. Це пов'язано з швидким біологічним розкладанням тканин, що призводить до втрати їх практичної цінності. Додатково необхідно враховувати анатомічні розбіжності у складних ділянках, зокрема в зоні задніх гратчастих комірок, клиноподібної та лобової пазух, а також особливості їх просторових взаємовідношень із сусідніми структурами.

Моделі, створені з овочів або тканин тваринного походження, виконують спільну функцію – вони допомагають сформувати базові навички володіння ендоскопічними інструментами та роботою з відеоендоскопічною системою. Проте такі засоби не можуть слугувати повноцінною та самодостатньою платформою для всебічної підготовки хірургів. Ефективність їх використання підтверджується відгуками учасників навчальних курсів, більшість з яких зазначили, що рекомендували б подібний підхід для початкового навчання майбутніх ординаторів [9].

Застосування анатомічних моделей, виготовлених за допомогою 3D-друку, створює значні переваги для хірургічної підготовки, дозволяючи здійснювати об'єктивне вимірювання рівня технічних умінь за допомогою стандартизованих підходів, зокрема методики об'єктивної структурованої оцінки технічних навичок (OSATS). Ефективність таких моделей у навчальному процесі була підтверджена під час дистанційного курсу, у межах якого лікарі-оториноларингологи, під наглядом досвідчених інструкторів, виконували симульовані фронтальні синусотомії на 3D-моделях, що відрізнялися за складністю та анатомічними варіаціями.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Під час курсу час виявлення дренажного шляху фронтальної пазухи (FSDP) зменшився з 1292 ± 672 с до 321 ± 267 с ($p = 0,017$), попри ускладнення анатомії. Об'єм FSDP збільшився з $2,36 \pm 0,00$ до $9,70 \pm 1,49$ мл ($p = 0,014$), що підтверджено за допомогою 3D-реконструкції в системі SYNAPSE VINCENT. Загальний освітній ефект курсу був оцінений учасниками на $95,5 \pm 5,1$ бала зі 100 можливих, а спостерігачами – на $89,2 \pm 15,8$ бала [10]. Розширене дослідження за участю 47 оториноларингологів (9 експертів, 19 фахівців середнього рівня, 19 новачків) дозволило валідувати ефективність 3D-моделей за шкалою OSATS (Objective Structured Assessment of Technical Skills). Експерти набрали $74,7 \pm 3,6$ бала, фахівці середнього рівня – $58,3 \pm 10,1$, новачки – $43,1 \pm 11,1$ ($p < 0,001$). У групі новачків, які проходили семисесійну тренувальну програму, OSATS зріс з $41,1 \pm 8,0$ до $61,1 \pm 6,9$ ($p < 0,001$), а час виконання mini-FESS скоротився з $1783,2 \pm 577,8$ до $861,6 \pm 441,0$ с ($p = 0,004$). Після завершення тренування 80% новачків вперше успішно виконали повний FESS на кадаврах, що вказує на високу адаптивність симуляцій до клінічної практики [11]. У порівняльному дослідженні 17 хірургів виконували ідентичні FESS-процедури на 3D-моделях і на кадаврах. За OSATS-оцінкою не було виявлено статистично значущих відмінностей: $50,41 \pm 13,31$ на моделях проти $48,29 \pm 16,01$ на кадаврах ($p = 0,36$). Аналогічно, час виконання mini-FESS не відрізнявся достовірно ($21:29 \pm 0:10$ хв проти $20:33 \pm 0:07$ хв, $p = 0,53$). Висока кореляція результатів між моделями та кадаврами ($r = 0,84$, $p < 0,001$) підтверджує об'єктивну придатність моделей як альтернативи для навчання та оцінки хірургів [12].

Представлені результати оцінки симуляційного курсу з функціональної ендоскопічної хірургії навколоносових пазух проведеного у рамках національної програми підготовки лікарів-оториноларингологів Ірландії, метою якого було вивчення ефективності навчання із застосуванням 3D-друкованих анатомічних моделей за допомогою моделі оцінки Кіркпатріка. У дослідженні взяли участь 21 лікар, для яких було організовано вебінар, лабораторну дисекцію та об'єктивне тестування до і після курсу. За результатами опитування, 95% учасників визнали моделі анатомічно точними, а 90% – зручними у

використанні. Після проходження курсу достовірно підвищились як анатомічні (з 54% до 62%), так і процедурні знання (з 65% до 72%). Більшість учасників повідомили про покращення впевненості, навичок та готовності до самостійної роботи. Водночас було відзначено недоліки – обмежену реалістичність слизової оболонки та відсутність імітації кровотеч. Автори наголошують на важливості подальшої валідації моделей та поступового вдосконалення. Симуляційне навчання розглядається як ефективне доповнення до традиційної хірургічної підготовки, особливо в умовах обмеженого доступу до операційної практики [13]. Також розглядається освітній потенціал персоналізованих 3D-друкованих моделей у хірургічній підготовці пацієнтів. Автори підкреслюють, що такі моделі є ефективним візуальним інструментом, який сприяє кращому розумінню анатомії, діагнозу, запланованого лікування та можливих ускладнень.

Для уніфікації підходів до оцінювання було створено спеціальний опитувальник, сформований на основі аналізу 173 запитань із попередніх досліджень різних медичних напрямів. Використовуючи модифікований метод Дельфі та залучивши як експертів, так і пацієнтів, дослідники розробили підсумкову анкету з 18 пунктів, придатну для широкого застосування. Під час процесу валідації наголошено на значущості врахування пацієнтського досвіду як ключового компонента ефективності освітнього процесу. Основна частина питань стосувалася розуміння суті медичних процедур і підвищення впевненості пацієнтів у прийнятті рішень щодо власного лікування. Створений інструмент відповідає вимогам доступності – рівень читабельності нижчий за 8 клас, а час заповнення не перевищує п'яти хвилин. Результати роботи свідчать, що 3D-моделі можуть ефективно підсилювати комунікацію під час отримання інформованої згоди та в процесі передопераційного консультування. Автори підкреслюють, що запропонована анкета дає змогу об'єктивно оцінювати вплив 3D-моделей на обізнаність пацієнтів щодо власного стану та на загальний освітній результат у клінічній практиці.

Застосування 3D-моделей у хірургічному навчанні забезпечує більш глибокий освітній ефект порівняно з традиційними кадаверними курсами, оскільки виконані тренувальні втручання можна об'єктивно аналізувати за допомогою післяопераційної комп'ютерної томографії, що дозволяє кількісно оцінити повноту та точність виконання. Однією з головних переваг 3D-моделей є можливість багаторазового повторення процедур, що сприяє ефективнішому засвоєнню практичних навичок.

Наявність набору з дев'яти моделей різного рівня складності та з різними анатомічними варіаціями дозволяє адаптувати навчальний процес до індивідуального рівня підготовки хірурга. Стандартизованість друкованих моделей забезпечує системний підхід до навчання, дозволяючи поступово формувати компетентності — від опанування базових технік до виконання складних втручань у максимально наближених до клінічних умовах. Крім самостійного опанування практичних навичок, студенти можуть навчатися через спостереження за виконанням процедур досвідченими хірургами на аналогічних 3D-моделях, що допомагає засвоїти послідовність дій, техніку маніпуляцій та ключові анатомічні орієнтири.

Такі методи можуть застосовуватися як у форматі очних занять із наставником, так і дистанційно через онлайн-платформи. У дистанційному режимі експерт може одночасно контролювати роботу кількох студентів, забезпечуючи індивідуальний моніторинг, зворотний зв'язок та корекцію помилок без необхідності фізичної присутності в лабораторії [16].

Проте навіть стандартизовані моделі, включно з імітацією окремих патологій, не дають змоги отримати досвід роботи з анатомічними структурами, що характеризуються високою індивідуальною варіабельністю [17–19]. Саме тому метою роботи є розробка персоніфікованих анатомічних моделей на основі результатів томографічних досліджень.

Вхідними даними були набори томографічних зрізів з рентгенівського комп'ютерного томографа Siemens Somatom+Emotion області верхніх дихальних шляхів пацієнтів відділення голови та шиї Харківської обласної клінічної лікарні.

Сегментація томографічних зрізів для визначення анатомічних структур верхніх дихальних шляхів виконувалася виходячи з міркувань чіткого розділення вокселів з координатами (i, j, k) томографічного об'єму на ті, які належать анатомічним структурам з областю D , та областям, що містять повітря (зовнішнє середовище та повітряні порожнини верхніх дихальних шляхів)

$$H(i, j, k) = \begin{cases} 1; & (i, j, k) \in D; \\ 0; & (i, j, k) \notin D, \end{cases}$$

де $H(i, j, k)$ – бінарна характеристична функція вихідного томографічного об'єму $B(i, j, k)$, причому за індексами i, j змінюються координати в області k -го томографічного зрізу.

Результуюча сегментація виконується граничним методом за рівнем інтенсивності T згідно з відповідною формулою

$$H(i, j, k) = \begin{cases} 1; & B(i, j, k) \geq T; \\ 0; & B(i, j, k) < T, \end{cases}$$

де $B(i, j, k)$, – вихідний томографічний воксельний об'єм.

Граничне значення T визначалося за стандартними значеннями щільності повітря у одиницях Hu та відображенням у відповідному вікні візуалізації. Для зручності послідовного маніпулювання ендоскопом на ригідних моделях носових проходів перед проведенням комп'ютерно-томографічного дослідження виконувалася адреналізація області носової порожнини. Для усунення локальних артефактів, особливо в області носової порожнини та придаткових пазух, використовувалися послідовно методи медіанної фільтрації та логічної обробки фрагментів зображення [19-21] з використанням алгоритму нарощування областей. Результати сегментації повітряних шляхів носової порожнини на аксіальному томографічному зрізі показано на рисунку 4,а, а також визначення носових ходів на мультипланарній реконструкції у фронтальній проекції (див. рис. 4,б). Товщина зрізів складала 10 мм.

Сегментовані моделі в стереолітографічному форматі *stl* завантажувались до програми-слайсеру UltiMaker Cura v.5.6.0. На рисунку 5 можна побачити вигляд вихідного зображення томографічного зрізу з сегментованими структурами носової порожнини в програмі UltiMaker Cura. Після введення відповідних параметрів друку, що пов'язані з відповідною моделлю 3D-принтера, матеріалом та точністю і швидкістю друку, а також задавання орієнтації зрізу для відсутності структур, які можуть, фактично, «розташуватись в повітрі», що унеможливило їх друк за технологією DFM, виконується слайсинг на окремі рівні друку моделі томографічного зрізу та формування G-коду для завантаження у контролер друку 3D принтеру.

Початок прототипування моделі на етапі друку стартового шару з першим обмежуючим шаром наведено на рисунку 6. На рисунку 7 наведено результати друку перших двох шарів моделі томографічного зрізу. Готова позрізова натурна модель голови людини наведена на рисунку 8. Зрізи надруковано з однаковою товщиною.

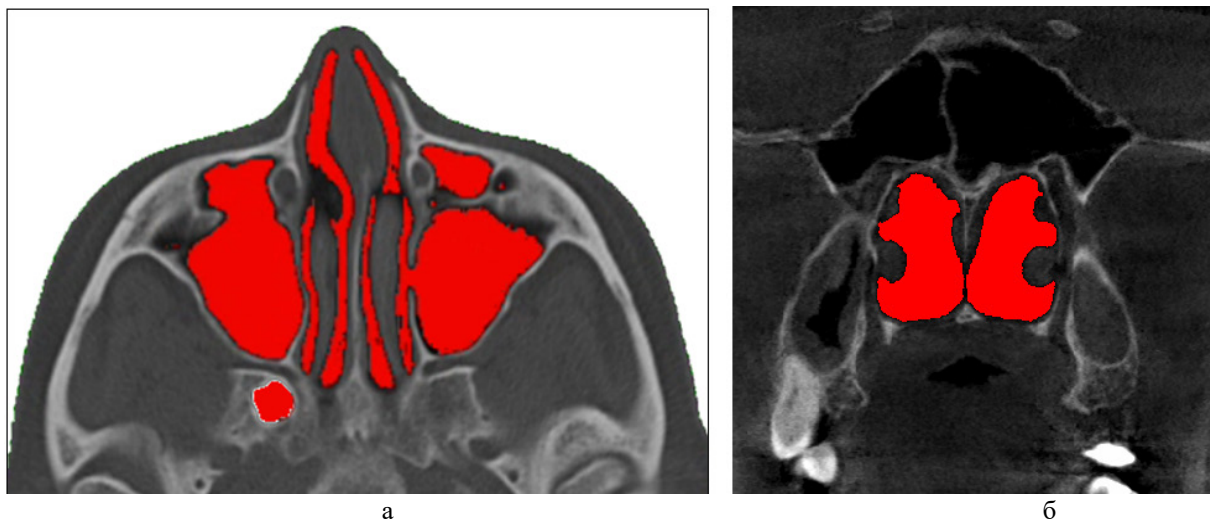


Рисунок 4 – Результати послідовної сегментації повітряних шляхів носової порожнини: а – на аксіальному томографічному зрізі, б – на мультипланарній реконструкції у фронтальній проекції (сегментовано лише носові ходи)

Моделювання ендоскопічного дослідження технічним ендоскопом діаметром 4 мм з напрямом огляду 0° наведено на рисунку 8. За допомогою моделі можливо забезпечити доступ з різних напрямків до обстежуваних областей. В перспективі є розробка моделі за фронтальними зрізами та використання методів штучного інтелекту [22-25] для підвищення достовірності сегментації анатомічних структур від повітряних порожнин.

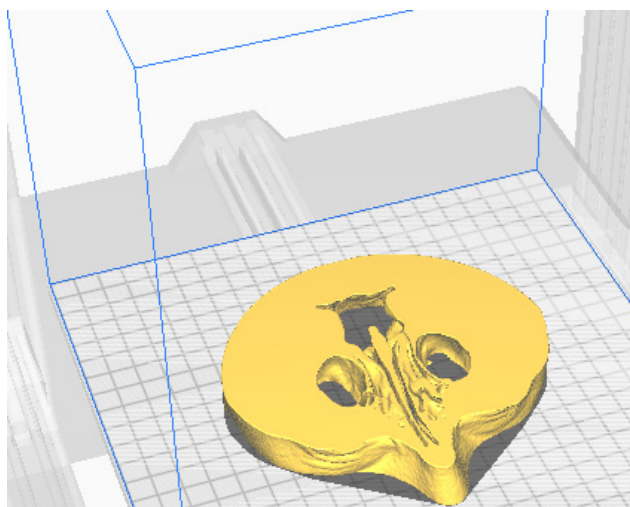


Рисунок 5 – Вихідне зображення томографічного зрізу з сегментованими структурами носової порожнини в програмі-слайсері UltiMaker Cura



Рисунок 6 – Початок прототипування моделі зрізу носової порожнини на етапі друку стартового шару з відображенням обмежуючої області друку



Рисунок 7 – Завершальний етап друку моделі томографічного зрізу з рисунку 5



Рисунок 8 – Готова позрізова натурна модель голови людини за КТ даними

ВИСНОВКИ

Використання 3D-друкованих моделей у підготовці хірургів значно розширює можливості медичної освіти, створюючи безпечне та контрольоване середовище для відпрацювання технічних навичок. Такі моделі дозволяють відточувати складні маніпуляції, забезпечують персоналізацію навчання з урахуванням індивідуальних анатомічних особливостей пацієнтів і підвищують якість підготовки майбутніх фахівців. Крім того, їхнє застосування зменшує ризики ускладнень під час реальних операцій, сприяючи підвищенню загального рівня безпеки пацієнтів.

Незважаючи на численні переваги, основним викликом залишається неможливість повністю відтворити клінічно реалістичні умови, включно зі слизовою оболонкою, кровотечею, забрудненням ендоскопічної оптики та іншими факторами, які ускладнюють прийняття рішень під час реальної хірургії. Крім того, впровадження 3D-моделей у навчальний процес обмежується технічними та економічними факторами: чим точніше модель імітує анатомічну реальність (мукоперихондріальні лоскутки, щільність кістки, судинні та м'які тканини), тим вищою є її вартість. Це створює перешкоди для широкого використання технології, особливо в установах із обмеженими ресурсами.

Водночас ці труднощі є технічно вирішуваними, адже розвиток адитивних технологій відкриває нові можливості для підвищення реалістичності симуляторів при одночасному зниженні витрат. Таким чином, інтеграція 3D-друку в медичні освітні програми є перспективним напрямом, що поєднує інноваційні технологічні рішення з практичними потребами хірургічної освіти, сприяючи підготовці висококваліфікованих спеціалістів. Навіть використання ригідних моделей верхніх дихальних шляхів та мініатюрних технічних ендоскопів дозволяє значно розширити можливості набуття практичних навичок майбутніми лікарями-ендоскопістами на початкових етапах навчання, що було успішно апробовано та впроваджено на кафедрі біомедичної інженерії ХНУРЕ та у відділенні голови і шиї Харківської обласної клінічної лікарні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Сучасні технології фантомного моделювання в нейрохірургії як різновид симуляційного навчання лікарів-нейрохірургів / В. О. П'ятикоп, О. Г. Аврунін, М. Ю. Тимкович, І. О. Кутовий, І. О. Полях // Симуляційне навчання в системі підготовки медичних кадрів: матеріали навч.-метод. конф. – Харків: ХНМУ, 2016. – С. 136–138.
2. Комп'ютерне планування малоінвазивних втручань в офтальмології та нейрохірургії / Аврунін О. Г., Філатов В. О., Тимкович М. Ю., Кухаренко Д. В., П'ятикоп В. О. – Харків: ХНУРЕ, 2020. – 160 с. DOI: 10.30837/978-966-659-283-8.
3. Ayub S. M. "See one, do one, teach one": Balancing patient care and surgical training in an emergency trauma department // J. Glob. Health. – 2022. – Vol. 12. – P. 03051. DOI: 10.7189/jogh.12.03051.

4. Avrunin O. G. et al. Application of 3D printing technologies in building patient-specific training systems for computing planning in rhinology // *Information Technology in Medical Diagnostics II*. – 2019. – P. 1–8. DOI: 10.1201/9780429057618-1.
5. Avrunin O. et al. Computed tomography dataset analysis for stereotaxic neurosurgery navigation // *Proc. Int. Conf. Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL)*. – 2019. – P. 606–609. DOI: 10.1109/CAOL46282.2019.9019459.
6. Tiwari D., Vobilisetty R. K., Heer B. Current Application and Future Prospects of 3D Printing in Otorhinolaryngology // *Indian J. Otolaryngol. Head Neck Surg.* – 2022. – Vol. 74(1). – P. 123–126. DOI: 10.1007/s12070-021-02634-5.
7. Meyer-Szary J. et al. The Role of 3D Printing in Planning Complex Medical Procedures and Training of Medical Professionals // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. – 2022. – Vol. 19(6). – P. 3331. DOI: 10.3390/ijerph19063331.
8. Tikka S. et al. A Feasible, Low-Cost Capsicum and Tomato Model for Endoscopic Sinus and Skull Base Surgery Training // *Indian J. Otolaryngol. Head Neck Surg.* – 2022. – Vol. 74(Suppl 3). – P. 4565–4570. DOI: 10.1007/s12070-021-02583-z.
9. De Oliveira H. F. et al. A feasible, low-cost, reproducible lamb's head model for endoscopic sinus surgery training // *PLoS One*. – 2017. – Vol. 12(6). – e0180273. DOI: 10.1371/journal.pone.0180273.
10. Suzuki M. et al. Remote Training of FESS With Advanced 3D Models and Telemedicine System // *Front. Surg.* – 2021. – Vol. 8. – 746837. DOI: 10.3389/fsurg.2021.746837.
11. Suzuki M. et al. Repetitive simulation training with novel 3D-printed sinus models // *Laryngoscope Investig. Otolaryngol.* – 2022. – Vol. 7(4). – P. 943–954. DOI: 10.1002/lio2.873.
12. Suzuki M. et al. Can high-fidelity 3D models replace cadavers in skill assessment for ESS? // *Front. Med.* – 2024. – Vol. 11. – 1301511. DOI: 10.3389/fmed.2024.1301511.
13. Gillanders S. L. et al. Safe surgical training: evaluation of national FESS model course // *Ir. J. Med. Sci.* – 2023. – Vol. 192(6). – P. 3039–3042. DOI: 10.1007/s11845-023-03309-6.
14. Schlegel L. E. et al. Understanding the Patient Experience With Personalized 3D Models // *Cureus*. – 2023. – Vol. 15(2). – e35134. DOI: 10.7759/cureus.35134.
15. Pettersson A. B. V. et al. Legal issues and underexplored data protection in medical 3D printing // *Front. Bioeng. Biotechnol.* – 2023. – Vol. 11. – 1102780. DOI: 10.3389/fbioe.2023.1102780.
16. Varshney R. et al. The McGill simulator for ESS (MSESS): validation study // *J. Otolaryngol. Head Neck Surg.* – 2014. – Vol. 43(1). – 40. DOI: 10.1186/s40463-014-0040-8.
17. Avrunin O. G. et al. Study of the air flow mode in the nasal cavity // *Proc. SPIE*. – 2017. – Vol. 10445. – 104453H. DOI: 10.1117/12.2280941.
18. Saied H. F. I., Al-Omari A. K., Avrunin O. G. Determination of aerodynamic characteristics of nasal airways // *Advances in Intelligent and Soft Computing*. – 2011. – Vol. 102. – P. 311–322. DOI: 10.1007/978-3-642-23154-4_35.
19. Avrunin O. G. et al. Principles of computer planning in functional nasal surgery // *Przegląd Elektrotechniczny*. – 2017. – Vol. 93(3). – P. 140–143. DOI: 10.15199/48.2017.03.32.
20. Avrunin O. G. et al. Image Segmentation of the Upper Respiratory Tract // *Proc. ELNANO 2019*. – P. 485–488. DOI: 10.1109/ELNANO.2019.8783739.
21. Nosova Y. V. et al. Pre-Processing of Tomographic Images for Segmentation of Paranasal Sinuses // *Proc. ELNANO 2019*. – P. 489–492. DOI: 10.1109/ELNANO.2019.8783713.
22. Chatterjee S. et al. Classification of brain tumours in MR images using deep spatiotemporal models // *Sci. Rep.* – 2022. – Vol. 12. – 1505. DOI: 10.1038/s41598-022-05572-6.
23. Mzoughi H. et al. Deep multi-scale 3D CNN for glioma classification // *J. Digit. Imaging*. – 2020. – Vol. 33. – P. 903–915.
24. He K. et al. Deep residual learning for image recognition // *Proc. CVPR*. – 2016. – P. 770–778.
25. Інтелектуальні технології в медичній діагностиці, лікуванні та реабілітації: монографія / Павлов С. В., Аврун О. Г., Злепко С. М. та ін. – Вінниця: ПП «ТД «Едельвейс і К», 2019. – 260 с.
26. Kozhem'yako V. P. Optical-electronic methods and tools for processing and analyzing biomedical images [monograph] / V. P. Kozhem'yako, S. V. Pavlov, K. I. Stanchuk. – Vinnytsia: UNIVERSUM, 2006 – 203 p.
27. Pavlov S. V. *Information Technology in Medical Diagnostics* // Waldemar Wójcik, Andrzej Smolarz, July 11, 2017 by CRC Press - 210 Pages.

28. Wójcik W., Pavlov S., Kalimoldayev M. Information Technology in Medical Diagnostics II. London: (2019). Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book. – 336 Pages.

REFERENCES

1. Modern technologies of phantom modeling in neurosurgery as a type of simulation training of neurosurgeons / V. O. Pyatikop, O. G. Avrunin, M. Yu. Tymkovich, I. O. Kutovy, I. O. Polyakh // Simulation training in the system of medical personnel training: materials of educational and methodological conference – Kharkiv: KhNMU, 2016. – P. 136–138.
2. Computer planning of minimally invasive interventions in ophthalmology and neurosurgery / Avrunin O. G., Filatov V. O., Tymkovich M. Yu., Kukharensko D. V., Pyatikop V. O. – Kharkiv: KhNURE, 2020. – 160 p. DOI: <https://doi.org/10.30837/978-966-659-283-8>.
3. Ayub S. M. "See one, do one, teach one": Balancing patient care and surgical training in an emergency trauma department // J. Glob. Health. – 2022. – Vol. 12. – P. 03051. DOI: <https://doi.org/10.7189/jogh.12.03051>.
4. Avrunin O. G. et al. Application of 3D printing technologies in building patient-specific training systems for computing planning in rhinology // Information Technology in Medical Diagnostics II. – 2019. – P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429057618-1>.
5. Avrunin O. et al. Computed tomography dataset analysis for stereotaxic neurosurgery navigation // Proc. Int. Conf. Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL). – 2019. – P. 606–609. DOI: <https://doi.org/10.1109/CAOL46282.2019.9019459>.
6. Tiwari D., Vobilisetty R. K., Heer B. Current Application and Future Prospects of 3D Printing in Otorhinolaryngology // Indian J. Otolaryngol. Head Neck Surg. – 2022. – Vol. 74(1). – P. 123–126. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12070-021-02634-5>.
7. Meyer-Szary J. et al. The Role of 3D Printing in Planning Complex Medical Procedures and Training of Medical Professionals // Int. J. Environ. Res. Public Health. – 2022. – Vol. 19(6). – P. 3331. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph19063331>.
8. Tikka S. et al. A Feasible, Low-Cost Capsicum and Tomato Model for Endoscopic Sinus and Skull Base Surgery Training // Indian J. Otolaryngol. Head Neck Surg. – 2022. – Vol. 74(Suppl 3). – P. 4565–4570. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12070-021-02583-z>.
9. De Oliveira H. F. et al. A feasible, low-cost, reproducible lamb's head model for endoscopic sinus surgery training // PLoS One. – 2017. – Vol. 12(6). – e0180273. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0180273>.
10. Suzuki M. et al. Remote Training of FESS With Advanced 3D Models and Telemedicine System // Front. Surg. – 2021. – Vol. 8. – 746837. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsurg.2021.746837>.
11. Suzuki M. et al. Repetitive simulation training with novel 3D-printed sinus models // Laryngoscope Investig. Otolaryngol. – 2022. – Vol. 7(4). – P. 943–954. DOI: <https://doi.org/10.1002/lio2.873>.
12. Suzuki M. et al. Can high-fidelity 3D models replace cadavers in skill assessment for ESS? // Front. Med. – 2024. – Vol. 11. – 1301511. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmed.2024.1301511>.
13. Gillanders S. L. et al. Safe surgical training: evaluation of national FESS model course // Ir. J. Med. Sci. – 2023. – Vol. 192(6). – P. 3039–3042. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11845-023-03309-6>.
14. Schlegel L. E. et al. Understanding the Patient Experience With Personalized 3D Models // Cureus. – 2023. – Vol. 15(2). – e35134. DOI: <https://doi.org/10.7759/cureus.35134>.
15. Pettersson A. B. V. et al. Legal issues and underexplored data protection in medical 3D printing // Front. Bioeng. Biotechnol. – 2023. – Vol. 11. – 1102780. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1102780>.
16. Varshney R. et al. The McGill simulator for ESS (MSESS): validation study // J. Otolaryngol. Head Neck Surg. – 2014. – Vol. 43(1). – 40. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40463-014-0040-8>.
17. Avrunin O. G. et al. Study of the air flow mode in the nasal cavity // Proc. SPIE. – 2017. – Vol. 10445. – 104453H. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2280941>.
18. Saied H. F. I., Al-Omari A. K., Avrunin O. G. Determination of aerodynamic characteristics of nasal airways // Advances in Intelligent and Soft Computing. – 2011. – Vol. 102. – P. 311–322. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-23154-4_35.
19. Avrunin O. G. et al. Principles of computer planning in functional nasal surgery // Przegląd Elektrotechniczny. – 2017. – Vol. 93(3). – P. 140–143. DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2017.03.32>.
20. Avrunin O. G. et al. Image Segmentation of the Upper Respiratory Tract // Proc. ELNANO 2019. – P. 485–488. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2019.8783739>.

21. Nosova Y. V. et al. Pre-Processing of Tomographic Images for Segmentation of Paranasal Sinuses // Proc. ELNANO 2019. – P. 489–492. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2019.8783713>.
22. Chatterjee S. et al. Classification of brain tumours in MR images using deep spatiotemporal models // Sci. Rep. – 2022. – Vol. 12. – 1505. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05572-6>.
23. Mzoughi H. et al. Deep multi-scale 3D CNN for glioma classification // J. Digit. Imaging. – 2020. – Vol. 33. – P. 903–915.
24. He K. et al. Deep residual learning for image recognition // Proc. CVPR. – 2016. – P. 770–778.
25. Pavlov S. V., Avrunin O. G., Zlepko S. M., Bodiansky E. V., Kolisnyk P. F., Lysenko O. M., Chaykovsky I. A., Filatov V. O. Intelligent technologies in medical diagnostics, treatment and rehabilitation: monograph. Vinnytsia: PP "TD "Edelweiss and K", 2019. 260 p.
26. Kozhem'yako V. P. Optical-electronic methods and tools for processing and analyzing biomedical images [monograph] / V. P. Kozhem'yako, S. V. Pavlov, K. I. Stanchuk. – Vinnytsia: UNIVERSUM, 2006 – 203 p.
27. Pavlov S. V. Information Technology in Medical Diagnostics //Waldemar Wójcik, Andrzej Smolarz, July 11, 2017 by CRC Press - 210 Pages.
28. Wójcik W., Pavlov S., Kalimoldayev M. Information Technology in Medical Diagnostics II. London: (2019). Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book. – 336 Pages.

Надійшла до редакції 15.11.2025р.

СОКОЛЬЦОВ АНДРІЙ – аспірант, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна, *e-mail: andrii.sokoltsov@nure.ua*

КАНДАУРОВ ІГОР – аспірант, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна, *e-mail: igor.kandaurov@nure.ua*

ПРИВАЛОВ БОГДАН – аспірант, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна, *e-mail: bohdan.pryvalov@nure.ua*

НОСОВА ТЕТЯНА – PhD, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна, *e-mail: tatyana.nosova@nure.ua*

ШУШЛЯПІНА НАТАЛІЯ – PhD, доцент, Харківський національний медичний університет кафедра оториноларингології, Харків, 61022, Україна, *e-mail: no.shushliapina@knmu.edu.ua*

НОСОВА ЯНА – PhD, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна, *e-mail: yana.nosova@nure.ua*

АВЕР'ЯНОВА ЛІЛІЯ – PhD, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна, *e-mail: lilya.averyanova@nure.ua*

АВРУНІН ОЛЕГ – д.т.н., професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна, *e-mail: oleh.avrunin@nure.ua*

ANDRII SOKOLTSOV, IHOR KANDAUROV, BOHDAN PRYVALOV, TATYANA NOSOVA,
NATALIIA SHUSHLIAPINA, YANA NOSOVA, LILIIA AVERIANOVA, OLEG AVRUNIN
**FULL-LIFE 3D MODELS AS AN EFFECTIVE TOOL FOR PRACTITIONING SKILLS OF
RHINOENDOSCOPIC INTERVENTIONS**

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv National Medical University