INTERNATIONAL SCIENCE SPACE

ЦИФРОВІ ТЕХНОЛОГІЇ У ПРАВІ, МЕДИЦИНІ ТА ЕКОНОМІЦІ: РЕГУЛЯТОРНІ МОДЕЛІ ТА ПРАКТИЧНІ ВИКЛИКИ

КОЛЕКТИВНА МОНОГРАФІЯ

Луцьк
Вежа-Друк
2026

УДК 004:[34+61+33]](02)
Ц 72

Рекомендовано до друку рішенням Вченої ради Державного вищого навчального закладу «Ужгородський національний університет» (Протокол № 12 від «25» вересня 2026 року).

Авторський колектив:

О. В. Батанов, Л. Б. Васильчук, С. Б. Карвацька, І. С. Пирога, Ю. М. Бисага, С. С. Пирога, І. О. Щербатюк, А. М. Лисенко, А. З. Ланкевич, А. М. Галайко, О. Н. Романюк, С. В. Павлов, Л. П. Денищич, В. П. Майданюк.

Рецензенти:

Дробуш І. В. – доктор юридичних наук, професор;
Щербанюк О. В. – доктор юридичних наук, професор.

Цифрові технології у праві, медицині та економіці: регуляторні моделі
Ц 72 **та практичні виклики:** колективна монографія / за заг. ред. В. В. Берч, В. І. Продан. **–** Луцьк : Вежа-Друк, 2026. – 364 с.

ISBN 978-966-940-783-2

Колективна монографія присвячена комплексному міждисциплінарному дослідженню цифрової трансформації права, медицини та економіки, її регуляторних моделей, інституційних передумов і практичних наслідків. У виданні розкрито теоретико-методологічні та прикладні проблеми цифрового конституціоналізму, електронного правосуддя в Україні та Європейському Союзі, цифрової трансформації міжнародного права під впливом штучного інтелекту і цифрових доказів, модернізації правового регулювання податкової політики в умовах європейської інтеграції. Окрему увагу приділено цифровій трансформації обліково-аналітичних систем підприємств, проблематиці громадського здоров'я та захисту репродуктивних прав, а також клінічному застосуванню тривимірного моделювання, штучного інтелекту і цифрових двійників у медицині. Міждисциплінарний характер видання дав змогу поєднати правовий, економічний, медичний і технологічний виміри цифровізації та простежити взаємозв'язок між технологічними інноваціями, трансформацією регуляторних механізмів, ефективністю функціонування відповідних систем і необхідністю забезпечення прав та законних інтересів людини. Монографія адресована науковцям, викладачам, здобувачам вищої освіти, правникам, медичним працівникам, економістам, представникам органів публічної влади та бізнесу, а також усім, хто професійно працює з проблематикою цифрової трансформації.

УДК 004:[34+61+33]](02)

ISBN 978-966-940-783-2
© Берч В. В., Продан В. І. (ред), 2026

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА **6**

РОЗДІЛ 1. ЦИФРОВИЙ КОНСТИТУЦІОНАЛІЗМ ЯК КОНЦЕПТ (О.В. Батанов) **11**

1.1. Теоретико-методологічні проблеми цифрового конституціоналізму 11

1.2. Людський вимір цифрового конституціоналізму 15

1.3. Цифровий конституціоналізм у фокусі організації та діяльності публічної влади 28

РОЗДІЛ 2. ЕЛЕКТРОННЕ ПРАВОСУДДЯ В УМОВАХ ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ: РЕГУЛЯТОРНІ МОДЕЛІ УКРАЇНИ ТА ЄВРОПЕЙСЬКОГО СОЮЗУ (Л.Б. Васильчук) **56**

2.1. Електронне правосуддя як регуляторна модель 58

2.2. Українська модель електронного правосуддя: становлення та ключові виклики 62

2.3. Європейська модель електронного правосуддя: наднаціональна інтероперабельність і національні практики 68

2.4. Процесуальні гарантії цифрового правосуддя: доступ, ідентифікація, докази та безпека 78

2.5. Напрями розвитку та критерії ефективності електронного правосуддя в Україні 87

РОЗДІЛ 3. ЦИФРОВА ТРАНСФОРМАЦІЯ МІЖНАРОДНОГО ПРАВА: ВПЛИВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ТА ЦИФРОВИХ ДОКАЗІВ НА СУЧАСНЕ МІЖНАРОДНО-ПРАВОВЕ РЕГУЛЮВАННЯ (С.Б. Карвацька) **103**

3.1. Цифровізація міжнародно-правового простору та трансформація традиційних моделей правового регулювання 103

3.2. Міжнародно-правові засади регулювання штучного інтелекту 112

3.3. Перспективи розвитку міжнародно-правового регулювання цифрового середовища та стратегічні орієнтири для України 129

РОЗДІЛ 4. ЦИФРОВА МОДЕРНІЗАЦІЯ ПРАВОВОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПОДАТКОВОЇ ПОЛІТИКИ УКРАЇНИ В УМОВАХ ЄВРОПЕЙСЬКОЇ ІНТЕГРАЦІЇ (І.С. Пирога, Ю.М. Бисага, С.С. Пирога, І.О. Щербатюк) **147**

4.1. Пріоритети цифровізації податкової політики України в контексті адаптації до стандартів ЄС 154

4.2. Цифрові інструменти податкової політики у забезпеченні функцій соціальної держави 163

4.3. Зарубіжний досвід цифрового моніторингу та оподаткування вивозу капіталу і великих статків 174

4.4. Правове регулювання рентних відносин в умовах упровадження цифрових технологій обліку природних ресурсів 183

4.5. Використання цифрових платформ для узгодження законних інтересів суб'єктів податкових правовідносин 193

РОЗДІЛ 5. ЦИФРОВА ТРАНСФОРМАЦІЯ ОБЛІКОВО-АНАЛІТИЧНОЇ СИСТЕМИ ПІДПРИЄМСТВА: КОНЦЕПЦІЯ, ІНСТРУМЕНТИ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ (А.М. Лисенко) **218**

5.1. Теоретичні засади формування обліково-аналітичної системи підприємства 218

5.2. Цифрові технології та інструменти функціонування сучасної обліково-аналітичної системи 223

5.3. Функціональна модель та інструментарій цифрової трансформації обліково-аналітичної системи 241

5.4. Система індикаторів ефективності цифрової трансформації обліково-аналітичної системи підприємства 257

РОЗДІЛ 6. ЦИФРОВІЗАЦІЯ ДЕРЖАВНОГО УПРАВЛІННЯ ЯК МЕХАНІЗМ ЗАПОБІГАННЯ ВИДАННЮ ТА ВИКОНАННЮ ЗЛОЧИННИХ НАКАЗІВ (А.З. Ланкевич) **268**

6.1. Владний наказ у цифровому середовищі як форма публічно-владного волевиявлення 268

6.2. Механізми фіксації походження, руху та зміни владного наказу 273
6.3. Цифрові процедурні запобіжники під час формування владного наказу 277
6.4. Контрольований виняток, цифровий аудит та гарантії належного функціонування системи 281
РОЗДІЛ 7. ГРОМАДСЬКЕ ЗДОРОВ'Я НАЦІЇ ТА ПРОБЛЕМИ ЗАХИСТУ РЕПРОДУКТИВНИХ ПРАВ НАСЕЛЕННЯ В УКРАЇНІ (А.М. Галайко) **292**
7.1. Громадське здоров'я як соціально-правова проблема сучасності.....292
7.2. Репродуктивне здоров'я української нації.....303
7.3. Питання рівного доступу у сфері репродуктивних прав людини 306
7.4. Насильство та його вплив на репродуктивне здоров'я нації.....309
РОЗДІЛ 8. КЛІНІЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ТРИВИМІРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ В МЕДИЦИНІ (О.Н. Романюк, С.В. Павлов, Л.П. Денищич, В.П. Майданюк) **326**
8.1. Використання тривимірного моделювання в кардіології.....327
8.2. Застосування у діагностиці онкологічних захворювань.....331
8.3. Тривимірне моделювання у травматології та ортопедії 334
8.4. Застосування у нейрохірургії та неврології.....337
8.5. Стоматологія та щелепно-лицева хірургія.....340
8.6. Використання тривимірного моделювання для проведення віртуальних медичних операцій.....342
8.7. Перспективи використання штучного інтелекту і цифрових двійників...350
ПІСЛЯМОВА **356**

21. Сироїд Т. Г. Міжнародно-правові основи захисту сексуального та репродуктивного здоров'я жінок. *Juris Europensis Scientia*. 2020. № 3. С. 151–155.

22. Андрусяк І. П. Запобігання та протидія домашньому насильству: теоретико-правове дослідження : дис. ... д-ра юрид. наук : 12.00.01. Львів : Національний університет «Львівська політехніка», 2024. 582 с. URL: https://lpnu.ua/sites/default/files/2024/dissertation/29132/disertaciya-andrusyak.pdf (дата звернення: 08.07.2026).

23. Sheeran N., Vallury K., Sharman L. S. et al. Reproductive coercion and abuse among pregnancy counselling clients in Australia: Trends and directions. *Reproductive Health*. 2022. Vol. 19, No. 1. Art. 170. DOI: https://doi.org/10.1186/s12978-022-01479-7.

24. Szalacha L. A., Hughes T. L., McNair R. et al. Mental health, sexual identity, and interpersonal violence: Findings from the Australian Longitudinal Women's Health Study. *BMC Women's Health*. 2017. Vol. 17. Art. 94. DOI: https://doi.org/10.1186/s12905-017-0452-5.

25. International Criminal Court Office of the Prosecutor. Crimes involving sexual, reproductive, and other gender-based violence: Policy on Gender-Based Crimes. 2023. URL: https://www.icc-cpi.int/sites/default/files/2023-12/2023-policy-gender-en-web.pdf (date of access: 08.07.2026).

26. Соломко І. Від сексуального насильства в Україні торік постраждали 52 чоловіки, 31 жінка і двоє дітей – звіт ООН. *Голос Америки*. 2024. 24 квіт. URL: https://www.holosameryky.com/a/oon_sexualne_nasylstvo_viyna_zvit/7581867.html (дата звернення: 08.07.2026).

27. Kovalchuk V., Komarnytska I. I., Rizenko O., Pasternak V., Kostiukova I. Public health of the nation and reproductive violence. *Reproductive Endocrinology*. 2025. No. 76. P. 57–64. DOI: https://doi.org/10.18370/2309-4117.2025.76.57-64.

РОЗДІЛ 8
КЛІНІЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ТРИВИМІРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ В МЕДИЦИНІ

Автори:

Романюк Олександр Никифорович, *доктор технічних наук, професор*

Завідувач кафедри программного забезпечення, Вінницький національний технічний університет;

Павлов Сергій Володимирович, *доктор технічних наук, професор, професор кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет***;**

Денищич Людмила Петрівна, *кандидат медичних наук, доцент, Вінницький національний медичний університет імені М.І. Пирогова;*

Майданюк Володими Павлович, *кандидат технічних наук, доцент кафедри программного забезпечення, Вінницький національний технічний університет*

Тривимірне моделювання стало одним із важливих інструментів персоналізованої медицини, оскільки дає змогу відтворювати органи, патологічні утворення й функціональні процеси конкретного пацієнта. Поняття тривимірної моделі охоплює цифрову реконструкцію, фізичний об’єкт, надрукований пошаровим способом, віртуальне операційне поле та основу для комп’ютерної симуляції. Вихідними даними є серії КТ, МРТ, ультразвукової й ангіографічної візуалізації, конусно-променевої томографії або оптичного сканування. Після сегментації потрібних структур створюють просторову сітку, перевіряють її геометрію та використовують для вимірювань, планування, навігації, виготовлення шаблонів чи індивідуальних виробів.

Клінічна цінність визначається не видовищністю об’ємного зображення, а його здатністю відповідати на конкретне діагностичне або лікувальне запитання. Найбільший ефект технологія має у спеціальностях, де складна просторова анатомія безпосередньо впливає на ризик втручання: кардіології, онкології, травматології та ортопедії, нейрохірургії, стоматології й щелепно-лицевій хірургії. Модель доповнює стандартний аналіз томограм, підтримує міждисциплінарне обговорення та дозволяє випробувати варіанти лікування до їх реалізації. Водночас якість результату залежить від первинних зображень, коректності сегментації, клінічної верифікації й прозорого позначення невизначеності; повноцінні цифрові двійники та біодрук поки переважно залишаються напрямами контрольованого дослідження.

8.1. Використання тривимірного моделювання в кардіології

У кардіології тривимірне моделювання особливо цінне через складну геометрію серця, постійну рухливість його структур і тісний функціональний зв’язок між анатомією та гемодинамікою. Звичайні двовимірні зрізи КТ або МРТ містять повну інформацію про досліджуваний об’єм, однак лікареві доводиться подумки відновлювати взаємне розташування камер, клапанів, магістральних судин і дефектів. Просторова реконструкція переносить цю розумову операцію в цифрове середовище, де модель можна обертати, розсікати довільними площинами, робити прозорою, вимірювати та зіставляти з майбутнім пристроєм. Для отримання моделі використовують кардіосинхронізовану КТ, МРТ серця, тривимірну ехокардіографію та ангіографічні дані; вибір методу залежить від того, чи потрібно детально відобразити кальциновані структури, м’які тканини, рух клапанів або судинний просвіт [1, с. 1-5].

Одним із найпереконливіших напрямів є планування лікування вроджених вад серця. За складних поєднань дефектів міжшлуночкової перегородки, аномалій відходження великих судин, однокамерної гемодинаміки або повторних операцій просторові відношення часто не вкладаються у стандартні

схеми. Персоналізована модель дає змогу оцінити, чи достатній внутрішньосерцевий простір для формування тунелю, яким буде його напрямок, чи не виникне компресії вихідного тракту та як розташовані коронарні артерії відносно запланованої лінії розрізу. У дитячій кардіохірургії фізична модель корисна ще й тим, що її можна оглянути з боку хірургічного доступу, відпрацювати послідовність маніпуляцій і узгодити план між кардіологом, радіологом, хірургом та анестезіологом. Це не скасовує аналізу вихідних зображень, але зменшує ризик різного трактування складної анатомії.

У структурній кардіології моделі застосовують під час підготовки транскатетерної імплантації аортального клапана, втручань на мітральному й тристулковому клапанах, закриття вушка лівого передсердя, параклапанних витоків і дефектів перегородок. Цифрова реконструкція дозволяє визначити розміри фіброзного кільця, висоту відходження коронарних артерій, обсяг і розподіл кальцифікації, кут аорти, конфігурацію вихідного тракту лівого шлуночка та можливі зони зіткнення пристрою з тканинами. Для мітральних втручань особливе значення має оцінка сідлоподібної форми кільця, взаємодії стулок і підклапанного апарату. Віртуальне розміщення протеза або оклюдера допомагає порівняти кілька типорозмірів, передбачити неповне прилягання, обструкцію чи компресію сусідніх структур і тим самим зробити вибір пристрою більш обґрунтованим .

Фізичний 3D-друк додає тактильний компонент і особливо корисний там, де необхідно відпрацювати доставку пристрою або перевірити його взаємодію зі складною геометрією. Жорсткі моделі добре відтворюють кісткові чи кальциновані елементи, проте для клапанів і судин потрібні еластичні полімери, здатні хоча б наближено імітувати деформацію тканини. На такій моделі можна випробувати розкриття стент-клапана, орієнтацію катетера, герметичність оклюдера або траєкторію доступу. Однак механічна подібність не є автоматичною: матеріал може правильно відтворювати форму, але не мати

відповідної товщини, анізотропії та в'язкоеластичних властивостей. Тому результати стендової симуляції слід трактувати як додаткову інформацію, а не як абсолютний прогноз поведінки живої тканини.

Окремий клас становлять обчислювальні моделі, у яких анатомічна геометрія поєднується з механікою рідини та твердого тіла. На основі КТ, МРТ або ехокардіографії можна побудувати пацієнт-специфічний домен для чисельного моделювання кровотоку, оцінити поля швидкості, тиску, зсувного напруження, турбулентність і зони застою. Такі підходи досліджують при коарктації аорти, аневризмах, складних шунтах, патології клапанів, коронарних стенозах та після реконструктивних операцій. Їхня перевага полягає у переході від опису форми до прогнозу функції: можна порівнювати різні діаметри протеза, варіанти анастомозу або кути імплантації. Водночас точність залежить від граничних умов, властивостей стінки, часової роздільної здатності та припущень моделі, тому клінічне використання потребує валідації на незалежних вимірюваннях.

У електрофізіології тривимірні реконструкції поєднують з картуванням електричної активності. Геометрія передсердь і шлуночків, рубцевих зон, легеневих вен та коронарного синуса допомагає планувати абляцію, а злиття передопераційної КТ або МРТ з електроанатомічною картою покращує просторову орієнтацію. Для складних шлуночкових тахікардій модель може показати товщину міокарда, післяінфарктний рубець, аневризму і близькість коронарних судин. Перспективним є моделювання поширення збудження та персоналізований прогноз ефекту абляційних ліній, однак електрофізіологічна поведінка серця визначається не лише геометрією, а й клітинними властивостями, фіброзом, автономною регуляцією та медикаментозним впливом. Саме тому повноцінна електрична модель потребує інтеграції даних кількох рівнів.

Важливою сферою є оцінка коронарних артерій та аорти. Тривимірна модель полегшує розуміння аномального відходження коронарної артерії, її проходження між аортою і легеневим стовбуром, складних хронічних оклюзій, біфуркаційних уражень та взаємного розташування гілок перед повторною операцією. Для аневризм і розшарувань аорти реконструкція показує протяжність ураження, істинний і хибний просвіти, відходження вісцеральних гілок та придатність зон фіксації ендопротеза. У поєднанні з внутрішньосудинними даними вона може підтримувати вибір довжини стент-графта і конфігурації фенестрацій. Проте артефакти руху, недостатнє контрастування дрібних гілок і помилки порогової сегментації здатні змінити геометрію просвіту, тому критичні вимірювання мають перевірятися на вихідних зрізах.

Тривимірні моделі використовують не лише для прийняття рішень, а й для навчання. Симулятори катетеризації, коронарографії, клапанних втручань і хірургічних доступів дозволяють багаторазово відпрацьовувати техніку без ризику для пацієнта. Пацієнт-специфічний симулятор особливо корисний перед рідкісною або нестандартною процедурою, коли типові тренажери не відтворюють необхідну анатомію. Для студентів і лікарів модель полегшує формування просторового мислення, а для пацієнта стає зрозумілим засобом пояснення вади, запланованої операції та потенційних обмежень. Комунікаційна функція не є другорядною: краще розуміння може підтримувати усвідомлену згоду, однак демонстрація моделі повинна супроводжуватися поясненням, що вона є спрощеним представленням, а не точною копією всіх властивостей органа.

Розвиток доповненої, віртуальної та змішаної реальності дає змогу працювати з моделлю без фізичного друку. Хірург може бачити напівпрозоре серце, приховувати окремі шари, вимірювати відстані, спільно переглядати модель з колегами та накладати її на операційне поле. Перевагами є швидкість оновлення, відсутність витрат матеріалу і можливість відображати рух у часі.

Недоліками залишаються залежність від точності реєстрації, затримка системи, обмежене поле зору та відсутність тактильного відчуття. У кардіології, де орган рухається і змінює форму протягом циклу, статичне накладання швидко втрачає відповідність, тому найбільш перспективними є моделі, синхронізовані з фазою серцевого циклу та інтраопераційною візуалізацією.

Отже, клінічна роль тривимірного моделювання в кардіології полягає у поєднанні анатомічної наочності, кількісної оцінки та попереднього випробування втручання. Найбільш зрілими є застосування у складних вроджених вадах, структурних процедурах, аортальній патології та навчанні. Подальше поширення залежить від стандартизації сегментації, доказів впливу на значущі клінічні результати, скорочення часу підготовки моделей і чіткого контролю якості. Огляд сучасних кардіоваскулярних застосувань підкреслює, що технологія вже вийшла за межі демонстраційних прототипів, але її користь найбільша тоді, коли модель створюється для визначеного рішення і перевіряється фахівцями, відповідальними за це рішення [1, с. 1-6].

8.2. Застосування у діагностиці онкологічних захворювань

В онкології тривимірне моделювання виконує подвійну функцію: воно допомагає просторово охарактеризувати пухлину в організмі та створює інженерні платформи для виявлення біомаркерів, дослідження пухлинного мікрооточення і прогнозування відповіді на лікування. У клінічній візуалізації вихідними даними є КТ, МРТ, ПЕТ/КТ, ПЕТ/МРТ, ультразвукові дослідження та, за потреби, цифрова патологія. Сегментація дозволяє відокремити первинне утворення, метастази, зони некрозу, судини, протоки й критичні органи. На відміну від простого об’ємного рендерингу, персоналізована модель може бути основою для точного вимірювання об’єму, площі контакту, просторової неоднорідності та динаміки під час серійних обстежень. Таке подання не замінює морфологічного підтвердження діагнозу, але доповнює стадіювання і передопераційну оцінку [2, с. 1-12].

Найочевидніша перевага полягає у відтворенні взаємовідношень пухлини з судинами та функціонально важливими структурами. Для утворень печінки модель може одночасно показувати портальні й печінкові вени, жовчні протоки, сегментарну будову та передбачуваний залишковий об'єм паренхіми. У нирковій онкології вона демонструє положення пухлини відносно чашково-мискової системи й ниркових судин; у легеневій - бронхосудинну анатомію сегмента; у пухлинах підшлункової залози - контакт із верхньою брижовою артерією, веною та ворітною веною. Така реконструкція допомагає уточнити технічну резектабельність, вибрати межі резекції, оцінити потребу в судинній реконструкції та сформувати спільне розуміння випадку на мультидисциплінарному консиліумі.

Для діагностичної інтерпретації важливим є не лише зовнішній контур новоутворення, а й його внутрішня гетерогенність. Різні ділянки пухлини можуть мати неоднакове контрастування, перфузію, дифузію, метаболічну активність і клітинність. Тривимірне картування таких ознак формує так звані просторові фенотипи або середовища пухлини, які можуть бути пов'язані з агресивністю, гіпоксією, некрозом і стійкістю до терапії. Радіомічні алгоритми перетворюють сегментований об'єм на набір кількісних ознак форми й текстури, а машинне навчання шукає зв'язок із гістологією, мутаційним профілем або прогнозом. Проте ці моделі чутливі до протоколу сканування, реконструкції зображення та способу сегментації, тому перед клінічним застосуванням потребують зовнішньої валідації та оцінки відтворюваності.

Тривимірне моделювання підтримує планування біопсії, особливо коли пухлина містить некротичні або неоднорідні ділянки. Поєднання морфологічних і функціональних зображень допомагає обрати мішень із найвищою ймовірністю отримання діагностичного матеріалу та уникнути великих судин, плеври, кишки чи інших небезпечних структур. У нейроонкології просторове суміщення МР-перфузії, спектроскопії, дифузійних даних і трактографії може визначати

найбільш інформативну зону для стереотаксичної біопсії. У кісткових пухлинах модель допомагає спланувати канал біопсії так, щоб він надалі був видалений разом із препаратом і не забруднював майбутній реконструктивний доступ. Водночас будь-яка навігація залежить від точності реєстрації та не повинна підміняти інтраопераційний контроль положення інструмента.

Під час хірургічного лікування модель перетворює діагностичну інформацію на план резекції. Вона дає змогу порівнювати органозберігаючі та розширені втручання, прогнозувати дефект і заздалегідь проєктувати реконструкцію. Показовим є досвід використання 3D-реконструкції при поширеному раку яєчника, де необхідно оцінити множинне ураження очеревини та близькість пухлинних конгломератів до кишки, сечоводів, великих судин і діафрагми. У ретроспективному дослідженні 60 пацієнток групи з тривимірною візуалізацією та з поєднанням візуалізації і друку мали коротшу тривалість операції та меншу крововтрату порівняно з оцінкою лише за двовимірними КТ-зображеннями. Водночас відмінностей у частоті рецидивів і загальних післяопераційних ускладнень переконливо не показано, що підкреслює потребу в більших проспективних дослідженнях [3, с. 1-10].

У променевій терапії тривимірна модель є основою окреслення мішені та органів ризику, розрахунку дозового розподілу і контролю положення пацієнта. Адитивне виробництво розширює ці можливості завдяки індивідуальним болюсам, фіксаторам, фантомам і аплікаторам для брахітерапії. Надрукований болюс може точніше повторювати складний контур шкіри, зменшуючи повітряні проміжки, а персоналізований аплікатор допомагає стабілізувати геометрію джерела відносно пухлини. Для перевірки плану друкують антропоморфні фантоми з матеріалів, підібраних за рентгенівською щільністю. Однак клінічна безпека вимагає дозиметричної перевірки кожного нового матеріалу й технології, оскільки внутрішня пористість, напрямок друку та нестабільність складу можуть змінювати ослаблення випромінювання.

Інший напрям стосується діагностичних пристроїв, створених методами 3D-друку. Мікрофлюїдні чипи, сенсорні масиви, тримачі для оптичних та електрохімічних детекторів можуть бути швидко адаптовані до конкретного біомаркера або набору біомаркерів. Геометрія каналів і реакційних камер визначає змішування, час контакту та концентрацію аналіту, а пошарове виробництво дозволяє інтегрувати кілька функцій в одному компактному пристрої. Такі системи досліджують для аналізу циркулюючих пухлинних клітин, нуклеїнових кислот, білків та метаболітів. Огляд онкологічних застосувань підкреслює потенціал швидкого прототипування й персоналізації, але також наголошує, що 3D-друк поки не замінює валідовані лабораторні методи, а повинен проходити аналітичну та клінічну верифікацію [2, с. 1].

Отже, у діагностиці онкологічних захворювань тривимірне моделювання найбільш корисне для просторового опису пухлини, оцінки резектабельності, вибору мішені для біопсії, планування променевої терапії та створення персоналізованих діагностичних платформ. Його перевагою є інтеграція різнорідних даних у наочну й вимірювану модель, а обмеженням – залежність від якості сегментації та ризик хибної впевненості в геометричній точності. Тому клінічний файл має містити відомості про джерело даних, часову точку, метод сегментації й межі невизначеності.

8.3. Тривимірне моделювання у травматології та ортопедії

У травматології та ортопедії тривимірне моделювання набуло широкого поширення завдяки високій контрастності кісткової тканини на КТ і безпосередньому зв’язку між геометрією та механічною функцією. Для складного перелому просторова реконструкція показує кількість і положення фрагментів, напрямок ліній перелому, ступінь імпресії суглобової поверхні та співвідношення з судинно-нервовими структурами. Особливо корисними є моделі таза, кульшової западини, плато великогомілкової кістки, проксимального відділу плечової кістки, стопи та хребта, де звичайна

рентгенографія або окремі зрізи не завжди дають цілісне уявлення. Модель можна «розібрати» на фрагменти, виконати віртуальну репозицію й порівняти кілька варіантів фіксації до операції.

Передопераційне планування включає визначення доступу, послідовності репозиції, положення пластини, довжини й напрямку гвинтів. Фізична копія кістки дозволяє попередньо контурювати стандартну пластину, що скорочує маніпуляції в рані та зменшує багаторазове згинання імплантата. Цифрове середовище дає змогу моделювати остеотомію, дзеркально відновлювати пошкоджену ділянку за контралатеральною стороною та оцінювати вісь кінцівки. Для деформацій після неправильного зрощення це особливо важливо: хірург може визначити центр деформації, кут і площину корекції, а потім перенести план за допомогою індивідуального різального або свердлильного шаблона.

Пацієнт-специфічні навігаційні шаблони фіксуються на унікальній поверхні кістки й задають напрямок свердління, резекції або встановлення компонента. Їх застосовують у коригувальних остеотоміях, ендопротезуванні, операціях на хребті, резекції пухлин і реконструкції великих дефектів. Перевагою є перенесення цифрового плану в операційну без складної оптичної навігації; обмеженням - залежність від точного прилягання. Якщо під час сегментації не враховано остеофіт, якщо поверхня змінилася після видалення м’яких тканин або шаблон встановлено з перекосом, траєкторія може бути неправильною. Тому дизайн повинен передбачати однозначну посадку, контрольні вікна й інтраопераційну перевірку.

В ендопротезуванні тривимірна модель допомагає оцінити кістковий запас, деформацію, центри ротації та взаємну орієнтацію компонентів. При складній ревізії кульшового суглоба вона показує розміри дефекту вертлюжної западини, положення колон і можливі зони опори для аугментів або індивідуального компонента. У колінному суглобі цифрове планування пов’язують з

відновленням механічної осі, ротаційним позиціонуванням і балансом м'яких тканин. Для молодих пацієнтів з пухлинними або посттравматичними дефектами застосовують індивідуальні пористі імплантати з титанових сплавів, геометрія яких відповідає дефекту, а внутрішня решітчаста структура сприяє зменшенню маси й потенційній остеоінтеграції.

Доказова база найкраще сформована для 3D-друкованих моделей і шаблонів у лікуванні переломів. Узагальнюючий огляд 2025 року, який проаналізував систематичні огляди та метааналізи, показав переваги 3D-друк-асистованої хірургії щодо тривалості операції, крововтрати та частини післяопераційних ускладнень у низці локалізацій. Для окремих переломів також відзначено кращі функціональні або рентгенологічні показники. Водночас автори звертають увагу на високу статистичну неоднорідність, відмінності технологій і якість первинних досліджень. Отже, позитивний середній ефект не означає однакової користі для кожного типу перелому; найбільш виправданим є застосування в анатомічно складних випадках, де модель реально змінює план операції [4, с. 1-9].

У хірургії хребта тривимірна реконструкція використовується для оцінки ніжок дуг, ротації хребців, вроджених аномалій, пухлин і посттравматичних деформацій. Віртуальне проведення гвинта дозволяє заздалегідь визначити діаметр, довжину та безпечний коридор, а шаблон може спрямовувати інструмент під час встановлення. Водночас хребет є рухомою багатосегментарною системою: положення пацієнта під час передопераційної КТ та на операційному столі відрізняється, а декомпресія або остеотомія змінює геометрію. Тому статичний шаблон не повинен створювати ілюзію повної навігаційної незалежності; у складних випадках його поєднують з флюороскопією, інтраопераційною КТ або оптичною навігацією.

Тривимірне моделювання також підтримує лікування ортопедичних пухлин. За допомогою МРТ визначають м'якотканинний і внутрішньокістковий компонент, за КТ - кортикальну структуру, після чого дані суміщають для

планування меж резекції. Віртуальна остеотомія допомагає зберегти максимально можливий обсяг здорової кістки й суглобову поверхню, а друкований шаблон відтворює обрану площину. Після резекції дефект може бути реконструйований алотрансплантатом, модульним протезом або індивідуальним імплантатом. Критично важливо закладати онкологічний запас і враховувати похибку реєстрації: геометрична точність не може бути досягнута ціною недостатньої радикальності.

Основними бар'єрами залишаються час сегментації, вартість, стерилізація, відповідальність за дизайн і різниця між віртуальною та реальною механікою. Кістка на моделі може бути геометрично точною, але її міцність, якість кортикального шару та остеопороз відтворюються обмежено. Для імплантатів необхідні контроль сировини, параметрів друку, термічної обробки, поверхні та втомної міцності. Тому клінічне впровадження має будуватися як керований виробничо-медичний процес із простежуваністю даних, перевіркою розмірів і чітким розподілом відповідальності між хірургом, інженером та виробником.

8.4. Застосування у нейрохірургії та неврології

У нейрохірургії тривимірне моделювання має особливу вагу, оскільки навіть невелика похибка траєкторії може призвести до ушкодження функціонально значущої кори, провідних шляхів або судин. Типова модель поєднує структурну МРТ, тонкошарову КТ кісток, КТ- чи МР-ангіографію, венографію, функціональну МРТ і дифузійно-тензорну трактографію. Після реєстрації модальностей хірург отримує єдиний просторовий контекст: пухлина, кора, шлуночки, артерії, вени, череп і основні пучки білої речовини відображаються як окремі керовані шари. Це дозволяє оцінювати не лише відстань, а й кут доступу, глибину, можливість ретракції та зони, де анатомічна невизначеність є найбільшою [5, с. 4–5].

При внутрішньочерепних пухлинах модель використовується для вибору положення пацієнта, розміру й локалізації краніотомії, напрямку коридору та

послідовності виділення судин. Для менінгіом важливо показати відношення до венозних синусів і живильних артерій; для гліом - межі інфільтрації відносно функціональної кори та трактів; для пухлин основи черепа - кісткові канали, черепні нерви й магістральні судини. Віртуальне планування не усуває біологічної невизначеності меж гліоми, але допомагає заздалегідь визначити ділянки, де максимальна резекція може конфліктувати зі збереженням функції. У таких випадках модель доповнює нейрофізіологічне картування й операцію у свідомості, а не замінює їх.

У судинній нейрохірургії тривимірна ангіографічна реконструкція є стандартним способом оцінки аневризм і артеріовенозних мальформацій. Вона показує шийку аневризми, відходження гілок, напрямок купола, перфорантні судини та можливі проєкції кліпсування. Фізичні еластичні моделі застосовують для репетиції мікрохірургічного або ендоваскулярного втручання, вибору форми кліпси, катетера, стента чи потік-відхиляючого пристрою. Для мальформацій модель може відображати живильні артерії, нідус і дренувальні вени, що полегшує поетапне планування емболізації та резекції. Однак дрібні перфоранти можуть бути нижче просторової роздільної здатності, а еластичність надрукованої судини відрізняється від живої, тому симуляція має межі.

Тривимірні моделі підтримують стереотаксичні процедури: біопсію, дренування, імплантацію електродів глибокої стимуляції мозку, стереоелектроенцефалографію та лазерну абляцію. Планувальна система дозволяє побудувати траєкторію, що проходить повз борозни, шлуночки й судини, а також порівняти кілька точок входу. При епілепсії просторово поєднують МРТ, ПЕТ, ЕЕГ-джерела та результати нейропсихологічного картування, щоб сформувати гіпотезу епілептогенної мережі. Тривимірне подання особливо корисне для обговорення складної конфігурації електродів, але остаточне рішення повинно спиратися на сукупність електрофізіологічних даних, а не на красу візуалізації.

Окремим напрямом є навчання й симуляція. Надруковані моделі черепа, шлуночкової системи, судин та пухлин дають змогу відпрацьовувати трепанацію, ендоскопічну навігацію, кліпсування, шунтування та накладання швів. Моделі з різною твердістю матеріалів можуть відтворювати кістку, тверду мозкову оболонку й м'які тканини, хоча точне відтворення мозкової консистенції залишається складним. Змішана реальність дозволяє накласти віртуальну анатомію на манекен або фізичну модель, поєднавши тактильний і візуальний досвід. За даними огляду цифрової нейрохірургії, 3D-реконструкція, 3D-друк, навігація, роботизовані системи, штучний інтелект і цифрові двійники дедалі частіше розглядаються як частини єдиного технологічного контуру [5, с. 1, 9–10].

У неврології тривимірне моделювання застосовується переважно для кількісного аналізу, а не для друку. Автоматизоване визначення об'єму гіпокампа, кори, шлуночків, вогнищ демієлінізації чи ішемічного ураження підтримує моніторинг нейродегенеративних, запальних і судинних хвороб. Просторові карти атрофії можуть бути зіставлені з нормативною базою, а мережеві моделі - показувати порушення структурних і функціональних зв'язків. Після інсульту 3D-реконструкція ураження допомагає аналізувати зв'язок між локалізацією та дефіцитом, планувати нейрореабілітацію, роботизовані вправи або неінвазивну стимуляцію. Водночас такі висновки мають імовірнісний характер: однакова анатомічна локалізація не гарантує однакового клінічного прояву через індивідуальну організацію мереж і пластичність.

Найсуттєвішою технічною проблемою нейрохірургічної моделі є зсув мозку. Після відкриття твердої оболонки, втрати спинномозкової рідини, резекції частини пухлини та зміни тиску анатомія відхиляється від передопераційної МРТ. Статична навігація поступово втрачає точність, особливо в глибині. Для оновлення використовують інтраопераційну МРТ, ультразвук, поверхневе сканування та деформівні алгоритми реєстрації. Саме тут тривимірна модель має

перейти від фіксованої карти до динамічної системи, яка враховує зміни під час операції. Проте кожне автоматичне оновлення повинно відображати невизначеність і бути перевіреним оператором.

З етичного й організаційного погляду цифрова нейрохірургія потребує захисту даних, контролю версій, сумісності форматів і чітких правил відповідальності. Алгоритм може запропонувати сегментацію або траєкторію, але лікар повинен бачити вихідні зображення та розуміти, де автоматичний результат ненадійний. Особливо небезпечним є перенесення моделі між різними часовими точками без урахування росту пухлини, набряку або зміни положення судин. Тому перед використанням необхідно підтвердити дату дослідження, коректність реєстрації та відповідність положенню пацієнта.

Узагальнюючи, тривимірне моделювання в нейрохірургії та неврології поєднує персоналізовану анатомію з функціональними й мережевими даними. Воно підвищує якість планування, навчання й комунікації, але не усуває фундаментальних джерел невизначеності: мікроскопічної інфільтрації, руху тканин, неповноти візуалізації та індивідуальної функціональної варіабельності. Найбільш перспективним є не окремий красивий 3D-об’єкт, а система, що оновлюється інтраопераційними даними, відображає похибку та взаємодіє з навігацією, роботикою й клінічним рішенням [5, с. 10–13].

8.5. Стоматологія та щелепно-лицева хірургія

Стоматологія є однією з найбільш цифровізованих галузей медицини, оскільки поєднує конусно-променеву КТ, інтраоральне оптичне сканування, фотографію, сканування обличчя та комп’ютерне проєктування. Об’єднання цих даних формує віртуального пацієнта, у якому можна одночасно аналізувати зубні ряди, оклюзію, кісткову основу й м’якотканинний профіль. Тривимірні моделі використовують для діагностики аномалій прикусу, планування ортодонтичного переміщення, цифрового воскового моделювання, виготовлення кап, тимчасових і постійних ортопедичних конструкцій. На відміну від традиційного гіпсового

відбитка, цифрова модель легко копіюється, порівнюється в динаміці та інтегрується з виробництвом.

В імплантології планування починається з оцінки об'єму кістки, положення нижньощелепного каналу, гайморової пазухи, сусідніх коренів і майбутньої ортопедичної конструкції. Протетично орієнтований підхід передбачає, що позиція імплантата визначається не лише наявною кісткою, а й оптимальним виходом коронки. Хірургічний шаблон переносить цей план у порожнину рота та задає точку входу, кут і глибину свердління. Точність залежить від якості КТ, сканування, суміщення даних, стабільності опори шаблона та допусків друку. Тому навіть за повністю навігаційного протоколу потрібні перевірка посадки, контроль охолодження і готовність змінити план за клінічної невідповідності.

У щелепно-лицевій хірургії тривимірне моделювання особливо важливе при асиметріях, ортогнатичних операціях, травмах, пухлинних резекціях і реконструкції нижньої щелепи. Віртуальне хірургічне планування дозволяє виконати остеотомії, перемістити фрагменти, оцінити оклюзію та м'якотканинний ефект. Оклюзійні сплінти, різальні й позиціонувальні шаблони переносять план у операційну. При реконструкції вільним малогомілковим трансплантатом заздалегідь визначають сегменти, кути остеотомій і положення відносно дефекту, а індивідуальна пластина фіксує заплановану форму. Це скорочує імпровізацію під час тривалої операції, але вимагає враховувати онкологічний запас і можливі зміни дефекту після остаточного патоморфологічного рішення.

Адитивне виробництво застосовують для анатомічних моделей, шин, шаблонів, тимчасових протезів, індивідуальних титанових пластин, імплантатів скронево-нижньощелепного суглоба та каркасів для регенерації кістки. Вибір матеріалу визначається призначенням: модель для пояснення може бути виготовлена з недорогого полімеру, тоді як пристрій, що контактує з тканиною або підлягає імплантації, потребує біосумісності, стерилізаційної стабільності й

контрольованих механічних властивостей. Сучасний огляд щелепно-лицевих застосувань відзначає найбільшу зрілість пацієнт-специфічних імплантатів, хірургічних шаблонів, сплінтів і кісткових моделей, а біодруковані регенеративні каркаси поки переважно належать до дослідницького рівня [6, с. 1-18].

Перевагою стоматологічного цифрового процесу є висока повторюваність і можливість швидкого виробництва, однак похибки накопичуються на кожному етапі. Металеві реставрації створюють артефакти КТ, слина й рух впливають на сканування, алгоритм може неправильно сумістити поверхні, а полімер після друку усаджується під час промивання та полімеризації. Клінічно значущою є не лише середня точність, а локальна похибка в зоні опори, контакту або проходження інструмента. Тому цифровий файл повинен перевірятися до виробництва, а готовий виріб - після друку й постобробки. Для повторного застосування важливі простежуваність партії матеріалу та документування циклу стерилізації.

Подальший розвиток галузі пов’язаний з інтегрованим плануванням зубних рядів, скелета й обличчя та з автоматичним визначенням зубів, каналів, патологічних вогнищ і цефалометричних орієнтирів. Генеративні алгоритми пропонуватимуть форму пластини, імплантата або протеза, проте остаточне рішення має враховувати клінічний огляд, стан пародонта, суглоба і м’яких тканин.

8.6. Використання тривимірного моделювання для проведення віртуальних медичних операцій

Поняття віртуальної медичної операції охоплює комп’ютерне відтворення майбутнього хірургічного втручання на основі тривимірної моделі конкретного пацієнта. На відміну від звичайного перегляду томографічних зрізів, у такому середовищі лікар може змінювати положення об’єкта, моделювати доступ, виконувати умовне розсічення або видалення тканин, переміщувати фрагменти,

добирати імплантати та оцінювати можливий результат ще до реальної операції. Віртуальна операція не є тотожною дистанційному роботизованому втручанню і не замінює клінічного рішення; її слід розглядати як цифрову репетицію, засіб передопераційного аналізу та безпечного порівняння альтернатив. Сучасні підходи поєднують системи віртуальної, доповненої та змішаної реальності, тривимірне моделювання, навігацію і симуляційне навчання, формуючи єдиний цифровий контур підготовки операції [8, с. 1204–1206].

Основою віртуального втручання є пацієнт-специфічна анатомічна модель. Її створення починається з одержання КТ, МРТ, ультразвукових, ангіографічних, ендоскопічних або оптичних даних, вибраних відповідно до клінічного завдання. Для кісткових структур пріоритетною зазвичай є тонкошарова КТ, для м'яких тканин і центральної нервової системи – МРТ, для судин – контрастна КТ- чи МР-ангіографія, а для поверхні обличчя, зубних рядів і шкіри – фотограмметрія або оптичне сканування. Мультимодальні набори реєструють у спільній системі координат, після чого сегментують органи, патологічні утворення, судини, нерви, кістки та інші критичні структури. Уже на цьому етапі визначається межа достовірності майбутньої симуляції: помилка у вихідному зображенні або сегментації надалі відтворюватиметься в усіх віртуальних діях [5, с. 1, 4–5].

Після сегментації формують полігональну або воксельну модель, усувають дефекти поверхні, перевіряють замкненість сітки, топологію, масштаб і відповідність контрольним вимірюванням. Для простого планування достатньою може бути геометрична реконструкція, однак відтворення маніпуляцій потребує додаткової інформації про товщину, рухомість, пружність, анізотропію та зв'язки тканин. У системах планування пластичних і реконструктивних втручань геометричні моделі поєднують із мультимодальними діагностичними даними, формують гібридні об'єкти та синтезують очікуваний післяопераційний вигляд. Такий підхід дозволяє не лише показати анатомію, а й послідовно відтворити зміну її конфігурації під час операції та у процесі відновлення [9, с. 57–65].

Віртуальне хірургічне планування доцільно розглядати як послідовність взаємопов'язаних задач. Спочатку визначають мету втручання і допустимий функціональний ризик, далі обирають положення пацієнта, доступ і траєкторії інструментів, моделюють резекцію або реконструкцію, оцінюють дефект та спосіб його заміщення, а потім перевіряють план на зіткнення з критичними структурами. Цифрове середовище дає змогу повернутися до будь-якого кроку, змінити розміри резекції, положення остеотомії чи тип імплантата та порівняти результати. Саме можливість багаторазового повторення без ризику для пацієнта відрізняє віртуальну операцію від традиційного передопераційного обговорення, де значна частина просторових рішень залишається уявною.

Реалістичність симуляції залежить від того, наскільки правильно відтворено механіку тканин. Жорстке тіло може бути достатнім для моделювання положення кісткового фрагмента або протеза, але не для мозку, печінки, серця чи судин, які деформуються під дією інструмента, тиску, гравітації та зміни наповнення. Для м'яких тканин застосовують моделі скінченних елементів, масово-пружинні системи, позиційно-залежну динаміку та інші чисельні підходи. Висока фізична точність потребує значних обчислювальних ресурсів, тоді як інтерактивна симуляція має реагувати майже без затримки. Тому практичні системи шукають компроміс між деталізацією й швидкістю, а клінічно значущі параметри мають задаватися за даними конкретного пацієнта, а не лише за усередненими властивостями тканин.

У нейрохірургії віртуальні операції особливо корисні через високу щільність функціонально важливих структур у невеликому об'ємі. Мультимодальна модель може одночасно містити пухлину, кору, шлуночки, артерії, вени, черепні нерви та тракти білої речовини. Хірург моделює положення голови, форму краніотомії, кут мікрохірургічного коридору, обсяг кісткової резекції та послідовність наближення до патології. Для аневризм можна порівнювати проєкції кліпсування, для стереотаксичної біопсії – кілька

траєкторій, що оминають судини й шлуночки, а для пухлин основи черепа – оцінювати доступність різних анатомічних вікон. Огляд цифрової нейрохірургії підкреслює, що 3D-реконструкція, симуляція, навігація, роботизовані системи та штучний інтелект поступово інтегруються в єдиний процес планування [5, с. 4–5, 9–10].

Найважливішим обмеженням нейрохірургічної симуляції є зміна анатомії під час реального втручання. Після відкриття твердої мозкової оболонки, втрати спинномозкової рідини, резекції частини пухлини або виникнення набряку відбувається зсув мозку, через що передопераційна модель перестає точно відповідати операційному полю. Подолання цієї проблеми потребує інтраопераційної МРТ або ультразвуку, поверхневого сканування, відстеження інструментів і деформівної реєстрації. Отже, найбільш перспективною є не статична віртуальна операція, а модель, яку можна оновлювати в реальному часі та яка відображає похибку суміщення. Водночас автоматичне оновлення має контролюватися хірургом, оскільки неправильно оцінена деформація може бути небезпечнішою за відсутність підказки [5, с. 10–13].

У серцево-судинній хірургії та інтервенційній кардіології віртуальна репетиція охоплює вибір доступу, позиціонування клапанів, оклюдерів і стент-графтів, моделювання катетерної траєкторії та прогноз гемодинамічних наслідків. На персоналізованій моделі можна порівняти типорозміри пристрою, оцінити ризик перекриття коронарних артерій, обструкції вихідного тракту або неповного прилягання до стінки. Для складних вроджених вад симуляція допомагає визначити просторову можливість внутрішньосерцевого тунелю чи реконструкції магістральних судин. Поєднання геометрії з обчислювальною гідродинамікою переводить планування від оцінки форми до аналізу функції, хоча результат залежить від граничних умов, властивостей судинної стінки та якості вихідної візуалізації [1, с. 1].

У травматології та ортопедії віртуальна операція часто починається з цифрового розділення уламків і їх послідовної репозиції. Хірург може відновити анатомічну форму за неушкодженою контралатеральною кісткою, визначити площину остеотомії, довжину та напрямок гвинтів, положення пластини або компонента ендопротеза. У випадках деформації хребта моделюють корекцію, безпечні коридори для транспедикулярних гвинтів і баланс хребтово-тазових параметрів. Результат симуляції може бути перенесений у операційну за допомогою індивідуальних різальних і свердлильних шаблонів або навігації. Узагальнені дані щодо 3D-друк-асистованого лікування переломів свідчать про потенційне скорочення часу операції та крововтрати, але ефект залежить від локалізації, складності випадку й якості досліджень [4, с. 1-9].

Щелепно-лицева та реконструктивна хірургія є одним із найнаочніших прикладів повного циклу віртуальної операції. Після суміщення КТ, сканів зубних рядів і поверхні обличчя виконують віртуальні остеотомії, переміщують фрагменти, контролюють оклюзію та прогнозують м’якотканинний профіль. При реконструкції нижньої щелепи малогомілковим трансплантатом визначають довжину сегментів, кути розпилів, положення відносно дефекту і конфігурацію фіксаційної пластини. Для пластичних втручань важливим є синтез очікуваного післяопераційного вигляду, однак такий прогноз слід подавати як модельований сценарій, а не як гарантований результат, оскільки загоєння, рубцювання та реакція м’яких тканин мають індивідуальну варіабельність.

В онкохірургії віртуальне планування спрямоване на досягнення достатньої радикальності за максимально можливого збереження функціональної тканини. Тривимірна модель показує взаємовідношення пухлини з судинами, протоками, нервами та сусідніми органами, дозволяє моделювати різні межі резекції і визначати майбутній дефект. Для печінки важливими є сегментарна будова, портальні та печінкові вени і залишковий об’єм паренхіми; для нирки – положення пухлини щодо судин і чашково-мискової системи; для підшлункової

залози – контакт з магістральними судинами. Віртуальна операція може також підтримувати планування складної циторедукції, однак жодна геометрична модель не здатна достовірно показати мікроскопічну інвазію, тому остаточні межі визначаються онкологічними принципами й інтраопераційними даними [2, с. 1; 3, с. 1].

Віртуальна, доповнена та змішана реальність виконують різні функції в межах одного технологічного процесу. Віртуальна реальність повністю занурює користувача у цифрове операційне поле і найбільше підходить для репетиції та навчання. Доповнена реальність накладає контури пухлини, судин або запланованої траєкторії на реальне зображення пацієнта чи ендоскопічний відеопотік. Змішана реальність дозволяє взаємодіяти з голографічною моделлю у просторі, змінювати прозорість шарів, виконувати вимірювання і спільно обговорювати план. Стан розвитку цих технологій показує поступовий перехід від демонстраційних моделей до клінічно орієнтованих систем, однак їх безпека визначається не якістю візуального ефекту, а точністю реєстрації, стабільністю відстеження та зрозумілістю інтерфейсу [8, с. 1204–1206].

Реєстрація є критичним етапом перенесення віртуального плану у реальну операційну. Необхідно встановити точну відповідність між координатами моделі, пацієнта, інструментів і пристрою візуалізації. Для цього застосовують анатомічні орієнтири, штучні маркери, поверхневе зіставлення, оптичне або електромагнітне відстеження. Похибка може виникати через рух пацієнта, деформацію м’яких тканин, перекриття маркерів, затримку відображення або неправильне калібрування. У високоризикових втручаннях слід оцінювати не лише середню помилку реєстрації, а й локальну точність біля критичної структури. Віртуальна підказка має зникати або позначатися як ненадійна, якщо система втрачає відстеження чи виходить за межі валідованого діапазону.

Важливим напрямом є навчання хірургів. Типовий симулятор формує базові психомоторні навички, тоді як пацієнт-специфічна віртуальна операція готує до

конкретної складної анатомії. Користувач може відпрацьовувати послідовність кроків, розпізнавання орієнтирів, реакцію на ускладнення та командну взаємодію. Цифрове середовище дає змогу об'єктивно фіксувати час, довжину траєкторії інструмента, кількість небезпечних контактів, надмірну силу та відхилення від плану. Такі метрики підтримують структуроване оцінювання компетентності, але мають бути пов'язані з реальними клінічними навичками. Високий результат у симуляторі не гарантує безпомилкової роботи з живою тканиною, якщо модель не відтворює необхідної складності або допускає нереалістичні дії [8, с. 1204–1206].

Подальше вдосконалення віртуальних операцій пов'язане зі штучним інтелектом. Алгоритми автоматизують сегментацію, розпізнають анатомічні орієнтири, будують поверхні, пропонують безпечні траєкторії та порівнюють варіанти імплантації. Генеративні методи можуть створювати форму пластини, протеза або реконструктивного елемента відповідно до заданих обмежень. Під час симуляції машинне навчання використовується для прогнозу деформації, класифікації етапу операції та виявлення небезпечного наближення інструмента. Проте автоматична рекомендація має бути перевірюваною: лікар повинен бачити вихідні дані, межі сегментації, показник невизначеності й причини запропонованого рішення. Особливої обережності потребують рідкісні патології та зображення з артефактами, для яких навчальна вибірка може бути недостатньою [5, с. 9–13].

Концепція цифрового двійника розширює віртуальну операцію від одноразової репетиції до моделі, що постійно пов'язана з конкретним пацієнтом. Такий двійник може поєднувати анатомію, механіку тканин, фізіологічні сигнали, лабораторні показники, дані інструментів і перебіг відновлення. До операції він використовується для порівняння сценаріїв, під час втручання – для оновлення положення й стану структур, після операції – для прогнозування ускладнень та планування реабілітації. Повноцінний двійник має не лише

відтворювати пацієнта, а й кількісно показувати невизначеність прогнозу. Сучасні медичні цифрові двійники залишаються різнорідними за зрілістю, проте саме поєднання механістичних моделей і даних пацієнта створює основу для перевірки альтернативних втручань in silico [7, с. 184–191].

Оцінювання системи віртуальних операцій має охоплювати кілька рівнів. На геометричному рівні перевіряють точність сегментації, відхилення поверхонь, розміри й положення орієнтирів. На функціональному рівні оцінюють реалістичність деформації, реакцію на інструмент та відповідність фізіологічним вимірюванням. На користувацькому рівні визначають час виконання, кількість помилок, когнітивне навантаження і зручність інтерфейсу. Клінічна валідація повинна показати, чи змінює система план, скорочує тривалість операції, крововтрату, променеве навантаження або частоту ускладнень. Важливо відокремлювати технічну точність від клінічної користі: система може добре відтворювати анатомію, але не покращувати результат, якщо її застосовують у простих випадках або вона ускладнює робочий процес.

Ризики віртуальних операцій пов’язані з якістю даних, людським фактором, залежністю від програмного забезпечення та кібербезпекою. Застаріле обстеження може не відповідати актуальному положенню пухлини або судин, артефакти спотворюють межі, а користувач інколи довіряє яскравій 3D-візуалізації більше, ніж вихідним зрізам. Тривимірна реконструкція водночас містить унікальні анатомічні ознаки, тому передавання моделей у хмарні сервіси потребує шифрування, автентифікації, контролю доступу і документованої згоди. Необхідні контроль версій, повторна перевірка моделі перед втручанням, резервний план та можливість продовжити операцію без цифрової системи. Віртуальна підказка повинна підтримувати професійне судження, а не підміняти його.

Організація віртуальної операції в медичному закладі потребує чіткого розподілу ролей: лікар формулює клінічне завдання й затверджує анатомічні

межі, інженер відповідає за обробку даних, а фахівець з якості документує перевірку та версію файлу. Для України перспективним є створення міждисциплінарних лабораторій, які обслуговують кілька клінічних підрозділів, розробляють локальні протоколи й накопичують валідовані кейси. Вітчизняні публікації розглядають 3D-моделювання, віртуальну та доповнену реальність і симуляційне навчання як основу віртуальних медичних операцій, водночас наголошуючи на ресурсних обмеженнях [8, с. 1204–1206]. Економічну доцільність слід оцінювати за витратами на персонал і обладнання та за можливим скороченням тривалості операції, повторних втручань і ускладнень.

Отже, тривимірне моделювання перетворює підготовку хірургічного втручання на керований цифровий експеримент. Його найбільша цінність полягає у можливості побачити складну анатомію з позиції майбутнього доступу, багаторазово відпрацювати послідовність дій, порівняти альтернативи та перенести обраний план у операційну за допомогою навігації, доповненої реальності, шаблонів або роботизованих систем. Водночас віртуальна операція залишається моделлю з обмеженою точністю, а її безпечне використання потребує якісних вихідних даних, валідації, відображення невизначеності та збереження провідної ролі лікаря. Подальший розвиток пов’язаний із динамічними цифровими двійниками, штучним інтелектом і реальним часом, але клінічне впровадження має визначатися не технологічною новизною, а доведеним поліпшенням результатів лікування [7, с. 184–191; 9, с. 57–65].

8.7. Перспективи використання штучного інтелекту і цифрових двійників

Узагальнення досвіду різних спеціальностей показує, що тривимірне моделювання виконує чотири взаємопов’язані функції: робить складну анатомію наочною, забезпечує кількісні вимірювання, дозволяє випробувати втручання до

його виконання та переносить цифровий план у реальний простір за допомогою шаблонів, навігації чи індивідуальних виробів. Кардіологія найбільше використовує моделі рухомих структур і гемодинаміки, онкологія – просторове стадіювання та планування лікування, ортопедія – репозицію й імплантати, нейрохірургія – мультимодальні траєкторії, а стоматологія – наскрізний цифровий процес.

Штучний інтелект здатний скоротити найбільш трудомісткий етап – сегментацію. Нейронні мережі автоматично виділяють камери серця, кістки, зуби, пухлини, судини й мозкові структури, визначають орієнтири та формують початкову тривимірну сітку. Наступними кроками є автоматичне виправлення дефектів геометрії, пошук безпечних коридорів і генеративне проєктування імплантатів. Проте алгоритм може непомітно помилятися за рідкісної патології, артефактів або нетипового протоколу, тому потрібні перевірка меж на вихідних зрізах, геометричні тести й документоване затвердження лікарем.

Найперспективнішою є інтеграція анатомії з функцією. Штучний інтелект може поєднувати зображення, лабораторні показники, геномні дані, електрофізіологію, сигнали носимих пристроїв та електронну медичну документацію. За такого підходу модель перестає бути статичним знімком і стає компонентом персоналізованого прогнозу. Повноцінний медичний цифровий двійник пов’язаний з конкретним пацієнтом, оновлюється новими даними, моделює альтернативні сценарії та формує прогноз для підтримки рішення. Найрозвиненішими напрямами залишаються кардіологія й онкологія, але клінічна зрілість проєктів істотно відрізняється [7, с. 184–191].

У кардіології цифровий двійник може порівнювати варіанти абляції, ресинхронізації або імплантації клапана; в онкології – моделювати ріст пухлини й відповідь на терапію; в ортопедії – навантаження імплантата та ремоделювання кістки; у нейрохірургії – деформацію мозку й зміну функціональних мереж; у стоматології – переміщення зубів і перебудову тканин. Реалістичний прогноз

потребує поєднання механістичних рівнянь з машинним навчанням: перші підтримують причинну інтерпретацію, друге виявляє складні закономірності великих масивів даних.

Перед широким упровадженням необхідно розв'язати питання сумісності даних, конфіденційності, кібербезпеки, упередженості та регуляторного нагляду. Тривимірний файл містить унікальну анатомічну інформацію, а динамічний двійник може додатково об'єднувати генетичні дані, спосіб життя й перебіг хвороби. Тому потрібні мінімізація доступу, шифрування, журналювання дій і прозора згода. Навчальні вибірки мають відображати різноманіття популяції, а лікар повинен уникати автоматизаційного упередження та бачити показник невизначеності прогнозу.

Доказовість має виходити за межі геометричної точності. Для кожного сценарію слід встановити, чи змінює модель клінічне рішення, скорочує час операції, зменшує ускладнення, поліпшує функціональний результат і виправдовує витрати. Потрібні багатоцентрові дослідження, стандартизовані кінцеві точки та постійний моніторинг систем після впровадження. Найреалістичніша перспектива полягає не в заміні лікаря, а в спільному середовищі, де штучний інтелект прискорює обробку, 3D-модель забезпечує просторове розуміння, шаблон переносить план у процедуру, а цифровий двійник перевіряє альтернативні сценарії [5, с. 13; 7, с. 184–191].

Висновки до Розділу 8

Тривимірне моделювання є важливим інструментом персоналізованої медицини, який забезпечує перетворення результатів КТ, МРТ, ультразвукової, ангіографічної, конусно-променевої та оптичної візуалізації на цифрові або фізичні пацієнт-специфічні моделі. Такі моделі дають змогу наочно відтворювати складні анатомічні структури, виконувати просторові вимірювання, оцінювати взаємне розташування органів і патологічних утворень,

моделювати варіанти лікування та переносити сформований цифровий план у клінічну практику за допомогою навігаційних шаблонів, індивідуальних імплантатів, комп'ютерної навігації та технологій доповненої реальності.

Найбільшу клінічну цінність тривимірне моделювання має у спеціальностях, де складна просторова анатомія безпосередньо впливає на безпечність і результативність втручання. У кардіології воно використовується для аналізу вроджених вад серця, планування транскатетерних і клапанних втручань, оцінювання патології аорти й коронарних судин, моделювання гемодинаміки та підготовки електрофізіологічних процедур. В онкології тривимірні моделі забезпечують просторове відображення пухлини, визначення її взаємозв'язку із судинами, протоками, нервами й органами ризику, уточнення резектабельності, вибір ділянки для біопсії, планування хірургічного та променевого лікування.

У травматології та ортопедії тривимірне моделювання дає змогу виконувати віртуальну репозицію кісткових фрагментів, планувати остеотомії, визначати положення пластин і гвинтів, створювати індивідуальні шаблони та імплантати. У нейрохірургії поєднання даних МРТ, КТ, ангіографії, функціональної МРТ і трактографії сприяє вибору безпечного хірургічного доступу, плануванню стереотаксичних процедур і збереженню функціонально важливих структур. У стоматології та щелепно-лицевій хірургії сформовано наскрізний цифровий процес – від отримання зображень до виготовлення хірургічних шаблонів, оклюзійних шин, протезів, пластин і пацієнт-специфічних імплантатів.

Водночас точність і клінічна достовірність тривимірних моделей залежать від якості вихідних зображень, правильності сегментації та реєстрації, параметрів побудови геометрії, характеристик матеріалів і клінічної перевірки результатів. Тривимірна модель не замінює вихідних медичних зображень, морфологічної верифікації та професійного рішення лікаря. Її використання має

супроводжуватися контролем похибок, документуванням етапів створення та визначенням меж невизначеності.

Перспективи подальшого розвитку пов’язані з використанням штучного інтелекту для автоматичної сегментації, пошуку анатомічних орієнтирів, вибору безпечних траєкторій і генеративного проєктування індивідуальних виробів. Інтеграція тривимірних моделей із лабораторними, генетичними, електрофізіологічними та іншими динамічними даними створює передумови для формування медичних цифрових двійників. Отже, тривимірне моделювання підвищує наочність, точність і обґрунтованість клінічних рішень, однак його ефективне впровадження потребує стандартизації робочих процесів, багатоцентрової клінічної валідації, оцінювання економічної доцільності та забезпечення захисту персональних даних.

Список використаних джерел

1. Ravi S. N. Three-Dimensional Printing in Cardiovascular Medicine: Clinical Applications and Technological Advancements. Journal of Cardiovascular Translational Research. 2026. Vol. 19. Art. 8. DOI: 10.1007/s12265-025-10733-9.

2. Wu J., Liang B., Lu S., Xie J., Song Y., Wang L., Gao L., Huang Z. Application of 3D printing technology in tumor diagnosis and treatment. Biomedical Materials. 2024. Vol. 19, No. 1. Art. 012002. DOI: 10.1088/1748-605X/ad08e1.

3. Cai Z., Zhang K., Li L., Suo Y. Application of 3D reconstruction and 3D printing technology in advanced ovarian cancer surgery: a retrospective study. Frontiers in Oncology. 2024. Vol. 14. Art. 1432970. DOI: 10.3389/fonc.2024.1432970.

4. Xiao L., Tang P., Yang S., et al. Comparing the efficacy of 3D-printing-assisted surgery with traditional surgical treatment of fracture: an umbrella review. Journal of

Orthopaedics and Traumatology. 2025. Vol. 26, No. 1. Art. 3. DOI: 10.1186/s10195-025-00819-0.

5. Yuan Z., Shi Z., Wang Z. Digital neurosurgery in the era of intelligent medicine: a scoping review. Frontiers in Medicine. 2025. Vol. 12. Art. 1700166. DOI: 10.3389/fmed.2025.1700166.

6. Wang X., Mu M., Yan J., Han B., Ye R., Guo G. 3D printing materials and 3D printed surgical devices in oral and maxillofacial surgery: design, workflow and effectiveness. Regenerative Biomaterials. 2024. Vol. 11. Art. rbae066. DOI: 10.1093/rb/rbae066.

7. Laubenbacher R., Mehrad B., Shmulevich I., et al. Digital twins in medicine. Nature Computational Science. 2024. Vol. 4. P. 184-191. DOI: 10.1038/s43588-024-00607-6.

8. Titova N. V., Romanyuk S. O., Kotlyk S. V., Romanyuk O. N., Pavlov S. V. Conducting virtual medical surgeries abroad and in Ukraine. Матеріали XVIII міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології і автоматизація – 2025», Одеса, 30–31 жовтня 2025 р. Одеса : ОНТУ, 2025. С. 1204–1206.

9. Романюк С. О., Павлов С. В., Романюк О. Н., Тітова Н. В. Інтелектуалізовані високопродуктивні системи планування пластичних і реконструктивних операцій на обличчі людини. Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. 2020. № 2 (40). С. 57–65. DOI: 10.31649/1681-7893-2020-40-2-56-64.

ПІСЛЯМОВА

Цифровізація дедалі виразніше змінює не окремі способи здійснення професійної діяльності, а саму архітектуру суспільних відносин, механізми прийняття рішень, характер взаємодії людини з державою та приватними суб'єктами, способи продукування, накопичення й використання інформації, а також критерії юридичної, економічної та професійної відповідальності. Саме тому предметне поле монографії закономірно охопило цифровий конституціоналізм, електронне правосуддя, міжнародно-правове регулювання штучного інтелекту й цифрових доказів, цифрову модернізацію податкової політики, трансформацію обліково-аналітичних систем підприємств, проблематику громадського та репродуктивного здоров'я, а також клінічне застосування тривимірного моделювання і цифрових двійників.

Об'єднання настільки різних за предметом напрямів в одному дослідженні виявило принципово важливу спільну рису: цифрова трансформація не може бути адекватно оцінена виключно за критеріями технологічної новизни, швидкості, економічної ефективності чи функціональної зручності. У кожній із досліджуваних сфер технологія входить у вже сформовану систему прав, компетенцій, професійних стандартів, інституційних гарантій та юридичної відповідальності. Відповідно, питання про допустимість цифрового рішення завжди є водночас питанням про межі втручання, прозорість процедур, достовірність даних, розподіл ризиків, можливість контролю та наявність механізмів захисту особи від несприятливих наслідків технологічно опосередкованого рішення.

Особливо виразно ця закономірність простежується у площині конституційного права. Цифрові технології вже не перебувають поза межами конституційної матерії, оскільки саме через цифрове середовище дедалі частіше реалізуються особисті, політичні, соціальні та культурні права. Цифрова грамотність, доступність технологій, захист від алгоритмічної дискримінації, інформаційна автономія, охорона персональних даних і гарантування прав особи

в умовах автоматизованого управління поступово перетворюються на складові сучасного конституційного дискурсу. Для України цей процес додатково поєднаний із необхідністю забезпечення кіберстійкості держави, захисту інформаційної інфраструктури та водночас збереження належного рівня свободи, приватності й цифрової автономії людини.

Не менш істотних трансформацій зазнає судова влада. Цифровізація правосуддя відкриває можливості для спрощення доступу до суду, підвищення оперативності процедур, електронного обміну документами та використання нових інструментів роботи з доказовою інформацією. Водночас технологічне удосконалення судової системи не може відбуватися за рахунок процесуальних гарантій. Ідентифікація учасників, надійність електронних доказів, захист інформації, доступність цифрових сервісів, сумісність платформ та можливість ефективної участі особи у провадженні залишаються юридично значущими умовами справедливого судового розгляду. Відтак цифрове правосуддя має оцінюватися не за кількістю впроваджених електронних сервісів, а за спроможністю таких сервісів забезпечувати функціонально повноцінну реалізацію права на судовий захист. Тематика відповідного розділу монографії саме й охоплює українську та європейську моделі електронного правосуддя, процесуальні гарантії доступу, ідентифікації, доказування та безпеки.

Аналогічної оцінки потребує вплив цифрових технологій на міжнародне право. Використання штучного інтелекту, цифрових доказів і алгоритмічних систем не заперечує усталених засад міжнародно-правового регулювання, однак істотно ускладнює умови їх практичного застосування. Достовірність походження цифрової інформації, її цілісність, можливість верифікації, непрозорість алгоритмічного висновку, ризики дискримінації та питання відповідальності стають новими елементами правової оцінки. Саме тому технологічна адаптація міжнародного права повинна супроводжуватися розвитком гарантій приватності, недискримінації, процесуальної добросовісності та довіри до механізмів прийняття рішень.

Економічний блок монографії засвідчує іншу, однак змістовно споріднену тенденцію. Цифровізація податкової політики та обліково-аналітичних систем змінює традиційне уявлення про державне адміністрування й управління підприємством. Автоматизований облік, електронний аудит, інтеграція даних, прогнозна аналітика, штучний інтелект, технології Big Data, цифрові системи контролю та підтримки управлінських рішень формують принципово інший рівень інформаційної спроможності як держави, так і суб'єктів господарювання. Для України цифрова модернізація податкової сфери водночас пов'язана з європейською інтеграцією, інституційною адаптацією та необхідністю поєднання ефективності фіскального адміністрування з принципами рівності, справедливості та правової визначеності.

У корпоративному вимірі цифрова обліково-аналітична система вже не зводиться до автоматизації бухгалтерського обліку. Вона поступово трансформується в інтегровану інформаційну платформу, де взаємодіють цифровий документообіг, контроль, аудит, аналітика, прогнозування, податкове адміністрування та підтримка управлінських рішень. У межах дослідженої моделі цифрова трансформація охоплює цифровізацію даних, автоматизацію процесів, інтеграцію систем, інтелектуалізацію аналітики, цифровий контроль та управлінську адаптивність. Це дозволяє говорити про зміну самої логіки управління: інформація перестає бути лише ретроспективним відображенням діяльності й набуває значення ресурсу прогнозування та формування управлінських альтернатив.

Медичний вимір цифровізації ще виразніше демонструє необхідність обмежувати технологічний оптимізм вимогами професійної та етичної відповідальності. Тривимірне моделювання, віртуальне планування втручань, штучний інтелект і цифрові двійники створюють нові можливості для персоналізації лікування, просторового аналізу анатомії, моделювання операцій і прогнозування результатів. Проте достовірність цифрової моделі безпосередньо залежить від якості вихідних даних, коректності сегментації, клінічної верифікації та належного відображення невизначеності. Технологічне

рішення не усуває професійної відповідальності лікаря і не може автоматично замінювати клінічне судження. У самій монографії підкреслено, що клінічне впровадження тривимірного моделювання має визначатися не технологічною новизною як такою, а доведеним покращенням результатів лікування.

Проблематика громадського та репродуктивного здоров'я доповнює технологічний вимір соціальним і правозахисним контекстом. Стан здоров'я населення залежить не виключно від клінічної спроможності системи охорони здоров'я, а й від доступності достовірної інформації, рівності доступу до відповідних послуг, міжвідомчої координації, здатності держави протидіяти дезінформації та забезпечувати безперервність профілактичних, лікувальних і реабілітаційних заходів. Особливої гостроти ці питання набувають в умовах воєнних загроз, коли стійкість медичної системи стає складовою загальної суспільної стійкості.

Сукупність проведених досліджень дозволяє окреслити ще одну важливу закономірність: цифровізація одночасно розширює можливості та збільшує концентрацію влади над даними, процедурами й рішеннями. Алгоритм здатний прискорити розгляд інформації, але водночас ускладнити розуміння логіки рішення; цифрова платформа може розширити доступ до послуги, але створити новий бар'єр для особи, яка не має достатньої цифрової компетентності; автоматизація може зменшити кількість рутинних операцій, але перенести ризик помилки з індивідуальної дії на системний рівень. Саме тому питання цифрової грамотності, доступності технологій, кібербезпеки, перевірюваності автоматизованих рішень і персоніфікованої відповідальності мають розглядатися як взаємопов'язані компоненти сучасної регуляторної політики. Питання цифрової грамотності та спеціального захисту вразливих категорій користувачів безпосередньо порушуються й у дослідженні цифрового конституціоналізму.

У цьому сенсі ключовим результатом міждисциплінарного прочитання представлених у монографії проблем є усвідомлення того, що ефективне регулювання цифрової трансформації не може будуватися за принципом

постфактумного реагування на вже реалізовану технологію. Право, професійні стандарти, етичні правила, механізми інституційного контролю та моделі відповідальності мають формуватися одночасно з упровадженням технологічних рішень. Для високоризикових сфер, зокрема, правосуддя, охорони здоров'я, публічного адміністрування, оподаткування, обробки персональних даних, така синхронізація набуває особливої ваги, оскільки наслідки технологічної помилки можуть безпосередньо впливати на правовий статус, майнове становище, здоров'я або реалізацію фундаментальних прав людини.

Перспективний напрям подальших досліджень тому пов'язаний із переходом від опису окремих цифрових інструментів до формування комплексних моделей їх правової та інституційної інтеграції. Потребують подальшого доктринального опрацювання природа цифрових прав, межі алгоритмічного управління, стандарти доказової надійності цифрової інформації, механізми перевірки автоматизованих рішень, моделі цифрової зрілості установ і підприємств, критерії клінічної валідності цифрових медичних технологій, а також способи забезпечення реальної відповідальності за рішення, у формуванні яких істотну роль відіграють алгоритмічні системи. У самому дослідженні цифрового конституціоналізму подальша наукова перспектива пов'язується, зокрема, з формуванням цілісної теорії цифрових прав, удосконаленням механізмів їх гарантування та аналізом цифрової нерівності.

Отже, цифрова трансформація права, медицини та економіки є не паралельним розвитком трьох автономних сфер, а проявом єдиного процесу перегляду усталених механізмів регулювання, професійної діяльності та інституційної взаємодії. Його подальший напрям залежатиме від того, наскільки технологічні можливості будуть узгоджені з принципами правової визначеності, безпеки, пропорційності, недискримінації, професійної відповідальності та поваги до людської автономії. Саме здатність утримати цей баланс має стати визначальним критерієм оцінювання цифрових реформ незалежно від сфери їх застосування.

Представлена колективна монографія не завершує дискусію про нормативні та практичні наслідки цифровізації. Її зміст, навпаки, засвідчує відкритість відповідного наукового поля та необхідність подальшої взаємодії правників, економістів, медиків, фахівців із цифрових технологій і представників суміжних галузей знань. Швидкість технологічних змін об'єктивно унеможливлює формування остаточних відповідей, однак саме міждисциплінарна наукова рефлексія дозволяє своєчасно визначати межі допустимого, формувати належні регуляторні моделі та запобігати ситуаціям, у яких технологічна ефективність досягається ціною послаблення правових, професійних чи етичних гарантій.

Наукове видання

ЦИФРОВІ ТЕХНОЛОГІЇ У ПРАВІ, МЕДИЦИНІ ТА ЕКОНОМІЦІ: РЕГУЛЯТОРНІ МОДЕЛІ ТА ПРАКТИЧНІ ВИКЛИКИ

Колективна монографія

Друкується в авторській редакції

Формат 60x84 $^{1}/_{16}$. Обсяг 21,16 ум. друк. арк., 21,01 обл.-вид. арк.
Наклад 300 пр. Зам. 119. Видавець і виготовлювач – Вежа-Друк
(м. Луцьк, вул. Шопена, 12, тел. + 38 066 936 25 49).
Свідоцтво Держ. комітету телебачення та радіомовлення України
ДК № 4607 від 30.08.2013 р.