



УДК 75.051.072:004

DOI <https://doi.org/10.15407/nz2024.02.415>

РОЛЬ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ЕКСПЕРТИЗИ ТА ПОПУЛЯРИЗАЦІЇ ТВОРІВ СТАНКОВОГО ЖИВОПИСУ

Тетяна ТИМЧЕНКО

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1814-4331>

кандидатка мистецтвознавства, доцентка, завідувачка кафедри техніки та реставрації творів мистецтва, Національна академія образотворчого мистецтва і архітектури, вул. Вознесеньський узвіз, 20, 04053, м. Київ, Україна, e-mail: tetiana.tymchenko@naoma.edu.ua

Антоніна МИКОЛАЙЧУК

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3536-7262>

аспірантка, Національна академія образотворчого мистецтва і архітектури, кафедра теорії та історії мистецтва, вул. Вознесеньський узвіз, 20, 04053, м. Київ, Україна, e-mail: tvorcha97akyla@gmail.com

Стаття присвячена проблемі запровадження сучасних інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) у галузь мистецтвознавчої й технологічної експертизи творів станкового живопису. Підкреслено значення та переваги цифрової обробки та створення високоякісних зображень, що сприяє поширенню знань про станковий живопис і уможлиблює детальніше його вивчення, особливо з урахуванням обмеженого доступу до оригіналів у музейних колекціях. Розглянуто роль ІКТ у набутті нових відомостей про твори живопису відомих майстрів шляхом запровадження новітніх методик технологічної та мистецтвознавчої експертизи; у популяризації музейних артефактів й покращенні взаємодії з відвідувачами.

Meta — дослідити значення запровадження інструментів ІКТ у різноманітних напрямках дослідження творів станкового живопису останніх десятиліть, у поглибленні знань про них та у популяризації цих знань серед дослідників та усіх зацікавлених осіб. Використано такі методи дослідження як історіографічний, джерелознавчий, фактологічний, метод систематизації отриманих даних і результатів.

Ключові слова: станковий живопис, музей, технологічна і мистецтвознавча експертиза, інформаційно-комунікаційні технології, нейронні мережі, штучний інтелект, віртуальна реальність, доповнена реальність.

Tetiana TYMCHENKO

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1814-4331>

Candidate of Arts (Ph. D), Associate Professor, Head of Department of Techniques & Restoration of Artworks, National Academy of Fine Arts and Architecture, 20, Voznesenskyi Uzviz Street, 04053, Kyiv, Ukraine, e-mail: tetiana.tymchenko@naoma.edu.ua

Antonina MYKOLAICHUK

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3536-7262>

PhD student, Faculty of Theory & History of Art, National Academy of Fine Arts and Architecture, 20, Voznesenskyi Uzviz Street, 04053, Kyiv, Ukraine, e-mail: tvorcha97akyla@gmail.com

THE ROLE OF INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES IN THE EXPERTISE AND POPULARIZATION OF EASEL PAINTINGS

Introduction. This article explores how modern digital technologies are transforming the analysis and comprehension of easel paintings. It emphasizes the significance and benefits of digitally processing and reproducing high-quality images. This not only disseminates knowledge about easel paintings but also facilitates their thorough examination, especially considering limited access to originals in museum collections.

Problem Statement. The article examines the role of ICT in acquiring new insights into paintings by renowned artists through the adoption of innovative techniques in technological and art historical expertise. It also explores the potential of ICT in popularizing museum artifacts and enhancing interaction with visitors.

Purpose. The aim of the article is to explore how implementing ICT tools, like machine learning algorithms and artificial intelligence automate recognition processes for styles, techniques, and characteristics, across various facets of research on easel paintings in recent decades provide rapid access to information and foster knowledge dissemination among researchers.

Methods. To achieve the stated objective, research methods such as historical, source-study, factual, and the method of systematization of obtained data and results were employed. Their outcomes deepen understanding of art history and spur the development of novel analysis and interpretation methods for easel paintings. They include the utilization of high-quality digital images for the analysis and classification of paintings using machine learning algorithms and artificial intelligence.

Results. Implementation of innovative digital technologies, including virtual reality, augmented reality, machine learning, and artificial intelligence, has significantly improved accessibility and comprehension of easel paintings.

In conclusion, this article underscores ICT's transformative role in studying and appreciating easel paintings. By harnessing digital technologies, researchers can surmount access barriers and delve deeper into the realm of art, enriching our understanding of cultural heritage and artistic expression. The ongoing collaboration between technology and art promises continued exploration and discovery in the field of art history.

Keywords: easel painting, museum, technological and art historical expertise, information and communication technologies, neural networks, artificial intelligence, virtual reality, augmented reality.

Вступ. Твір станкового живопису є складним багатоаспектним явищем, що зумовило постійне розширення методів його дослідження. Значні зрушення відбулися у зв'язку з розвитком суміжних галузей — матеріалознавства, історії техніки та технології, консервації-реставрації, превентивної консервації, що, своєю чергою, сприяло остаточному формуванню у ХХ ст. експертизи — специфічного напрямку дослідження, метою якого є встановлення важливих ознак, що вказують на час створення, оригінальність чи вторинність. За допомогою мистецтвознавчої експертизи визначають особливості стилістики й формотворення; шляхом технологічної експертизи (із використанням методів природничих наук) з'ясовують складові частини матеріальної структури у їхньому специфічному поєднанні, а також стан збереженості [1, с. 16; 2, с. 16]. Останні десятиліття, завдяки розвитку та впровадженню різноманітних інструментів ІКТ, було вдосконалено вже відомі методи технологічної експертизи й запропоновано нові методи мистецтвознавчих досліджень.

В Україні до цього часу з достатньою повнотою не були проаналізовані перспективи використання ІКТ у галузі експертизи та популяризації творів станкового живопису, що обумовлює *актуальність* нашого дослідження.

Аналіз численних, переважно зарубіжних публікацій останніх десятиліть, виявляє значну зацікавленість вчених у впровадженні ІКТ до галузі дослідження творів станкового живопису. Більшість оцінює їх внесок як позитивний, хоча існують і певні ризики.

Питання безпечного зберігання та обробки великого обсягу даних привернули увагу К. Флореа та Ф. Гізеке [3], А. Чжана [4], М.А.П. Хамікара та співавторів [5], М.І. Байг та її колег [6]; також вони обговорюються через онлайн-платформи, такі як Google Arts & Culture [7].

Проблематика отримання високоякісних цифрових зображень, які можуть використовуватися у різних напрямках досліджень та популяризації, розглянуто в роботах М. Паппаса та І. Пітаса [8], Ф. Станко та його колег [9], К. Куччі та співавторів [10].

Можливостям ІКТ у технологічній експертизі присвячені праці Р. Саєз-Фернандеса зі співавторами [11] (визначення пігментів монументального живопису); Х.А.М. Гарсія зі співавторами [12] (покращення цифрових радіографічних зображень

живопису на дерев'яних основах). Особливо вражаючими є результати впровадження методів, удосконалених за допомогою ІКТ, під час досліджень таких шедеврів, як «Нічна варта» Рембрандта (Рейксмузеум, Амстердам) під керівництвом Ф. Габріелі та його колег [13], а також Гентського вітваря братів Ван Ейк (Королівський інститут культурної спадщини у Брюсселі) під керівництвом З. Сабетсарвестані та його команди [14] та Н. Делігіанніса зі співавторами [15].

Дослідження, спрямовані на аналіз стилю, деталей та текстури творів мистецтва, виконані за допомогою спеціальних програм, розпочаті ще з 2000-х років; більшість з них базуються на технологіях штучного інтелекту (ШІ), зокрема на машинному навчанні. Так, використання нейронних мереж для визначення стилю може допомогти у визначенні автентичності та в атрибуції творів живопису, що засвідчують роботи Р. Дель К'яро зі співавторами [16] та Л.А. Гатіса з колегами [17; 18], що пропонують успішне використання згорткових нейронних мереж для відтворення стилів відомих майстрів на прикладі фотографій. Ці дослідження, проведені у Центрі обчислювальної нейронауки Вернера Райхардта й Інституті теоретичної фізики Тюбінгенського університету (Німеччина), заклали основи для подальших розробок, тому до них постійно звертаються інші вчені. Подібні підходи також досліджені у роботах Сін Вана з колегами [19] та А. Лекутра зі співавторами [20].

Методи комп'ютерного бачення і діджиталізації відкривають нові можливості для глибшого аналізу та вивчення мистецьких творів. Це підтверджується статтями А. Ельгаммала та його колег [21], А. Фока [22] та згаданою працею Р. Дель К'яро з колегами [16]. Вчені наводять численні приклади використання цих технологій для аналізу стилів, технік та текстур у творах станкового живопису, а також для категоризації зображень у великих базах даних.

Дослідження в галузі використання віртуальної та доповненої реальності для вивчення мистецтва та створення 3D-реконструкцій також викликають значне зацікавлення дослідників, про що свідчать роботи Зея Хі та його співавторів [23] і К. Мейнеке з колегами [24].

Метою нашого дослідження є науковий аналіз світового досвіду та перспектив застосування ІКТ у

технологічній та мистецтвознавчій експертизі творів станкового живопису, а також у покращенні взаємодії відвідувачів з музейними артефактами.

Завдання роботи — визначити роль і місце сучасних ІКТ в експертизі та популяризації творів станкового живопису.

Основна частина. Нерідко при вивченні творів станкового живопису виникає необхідність в уточненні питань датування, авторства чи походження, у тому разі, коли попередня атрибуція викликає сумнів. Мистецтвознавча експертиза творів станкового живопису використовує методи формально-стилістичного аналізу зображень й історико-документальних досліджень [1, с. 16—22]. Ці традиційні методи вивчення творів станкового живопису протягом останніх ста — ста п'ятдесяти років були значно доповнені методами точних наук, завдяки чому сформувалась технологічна експертиза. У наш час ІКТ стають важливим інструментом для покращення ефективності як мистецтвознавчої, так і технологічної експертизи творів станкового живопису.

Наприклад, застосування європейського синхротрону ESRF у м. Гренобль (Франція) відкрило нові можливості для вирішення питань, пов'язаних з технологією, яку використовував Рембрандт для створення імпастро на своїх полотнах [25]. Дослідження, проведене вченими з відділу матеріалознавства та інженерії Делфтського технологічного університету та Рейксмузеуму, є результатом співпраці з академічними й науковими установами, такими як Інститут вивчення хімії, Париж, Університет Сорбонна та Університет Амстердаму, Центр досліджень та реставрації музеїв Франції, Мауріцгейс, фонд ESRF.

Мікропроби (розміром менше 0,1 мм) були відібрані з трьох полотен Рембрандта — «Портрета Мартена Сульманса» (Рейксмузеум), «Вірсавії» (Музей Лувр) і «Сусанни» (Мауріцгейс). Аналіз проб здійснювався з використанням синхротрону, що дало змогу вченим визначити кристалічні фази імпастро, їхню морфологію та розмір, а також скласти точні карти розподілу сполук [25]. Виявлено, що плюмбунакрит $Pb_5(CO_3)_3O(OH)_2$, який раніше спостерігали у творах ХХ ст. й у творі В. Ван Гога, систематично використовував Рембрандт. Це можна розглядати як відмітну особливість рецептури Рембрандта та свідчення про використання ним лужного в'язива, що розкриває нові аспекти його техніки. Це відкрит-

тя потребує подальших досліджень на інших творах художника та його сучасників, як вказують В. Гонсалес та співавтори [25]; на думку П.Р. Кастеллі [26], крім подальшого розуміння історії творчості цього видатного митця та його стилю, ідентифікація плюмбунакрити може бути корисною для планування реставрації схожих творів.

У ХХІ ст. набирає популярності використання лазерної технології як високоточного інструменту для аналізу станкового живопису [27; 28]. Методи глибинного аналізу зразків станкового живопису минулих століть були обговорені 2018 р. вченими з Університету Масарика та Центральноєвропейського інституту технологій у Брно, спільно з Інститутом неорганічної хімії Академії наук та Лабораторією АЛМА, Академією образотворчих мистецтв у Празі та чеськими вченими-реставраторами. Результати досліджень були опубліковані у статті «Глибинний аналіз зразків історичного живопису за допомогою лазерно-індукованої спектроскопії розпаду та портативної рентгенівської флуоресценції» [28]. Для отримання інформації про стратиграфію та хімічний склад фарбових шарів було проведено глибокий аналіз багатошарових модельних зразків історичних картин за допомогою лазерно-індукованої спектроскопії (LIBS) у поєднанні з рентгенівською флуоресценцією (XRF), цифровою та 3D оптичною мікроскопією. Комбінація LIBS та XRF аналізів надала значну додаткову інформацію про елементний склад аналізованих багатошарових зразків [28].

Для отримання повної інформації про склад і розташування матеріалів у творі живопису одного методу недостатньо, тому зазвичай необхідний комплексний підхід, як, приміром, під час дослідницько-освітніх проєктів «НАМИСТО», де було використано методи мистецтвознавчої та технологічної експертизи (мікроскопія, дослідження в інфрачервоній (ІЧ) та ультрафіолетовій (УФ) зонах спектру, рентгенофлуоресцентний аналіз (РФА) та ІЧ спектроскопія) [29; 30] або в аналізі твору, що приписувався бразильському митцю-модерністу Ді Кавальканти [31]: Е.А. Каджія та її колеги провели комплексне дослідження, використавши методи дослідження в ІЧ, УФ та видимому світлі, а також хімічний аналіз пігментів та аналіз мазків художника. Кожен з цих методів надавав конкретну інформацію, яка, в поєднанні з іншими результатами, дала змогу встанови-

ти матеріали та техніку зображення, що допомогло ідентифікувати твір як підробку під художника Ді Кавальканті.

Створення високоякісних цифрових зображень творів станкового живопису за допомогою ІКТ надає унікальну можливість дослідникам отримати доступ до творів, що знаходяться на різних континентах і належать різним власникам. Онлайн-галереї також дають можливість побачити твори, які не експонуються постійно. Віртуальні музеї та онлайн-галереї стають платформами, де експерти можуть обмінюватися думками та результатами досліджень. Високоякісні зображення надають можливість детального вивчення текстури, кольору та деталей, а також аналізувати твори з різних ракурсів. Водночас наявність високоякісних цифрових зображень вирішує дилему музейного освітлення в експозиціях, яке має бути слабким для забезпечення кращої збереженості артефактів.

Створення цифрових архівів сприяє не лише поглибленому вивченню, а й проведенню порівняльного аналізу творів станкового живопису, що належать певному авторові чи школі, тобто сприяють проведенню експертизи й атрибуції. Вони дають змогу ретельно аналізувати технічні аспекти творів, включаючи стратифікацію, тобто виявлення окремих шарів, які відображають процес створення картини, що є важливим для розуміння техніки виконання. Порівняльний аналіз, таким чином, може здійснюватися на відстані, за відсутності можливості безпосереднього огляду творів.

Дослідження «Цифрова колірна реставрація старого живопису» [8], здійснене М. Паппасом та І. Пітасом з Університету Арістотеля у Салоніках, ілюструє, як цифрові технології можуть точно відтворити кожен мазок та деталь картини, забезпечуючи вірність оригіналу. Сучасні технології сканування, зокрема лазерні та оптичні сканери, дають змогу отримувати докладні тривимірні моделі, які фіксують текстуру, колір та інші дрібні деталі живописного зображення та інших частин творів [9; 10].

Використання значних обсягів цифрових даних відкриває широкі можливості для дослідження станкового живопису з використанням баз даних візуального мистецтва, віртуальних музеїв, архівів та інших ресурсів [32; 6]. Ці технології дають можливість виявляти основні тенденції та еволюцію художніх сти-

лів за допомогою статистичних методів, проводити аналіз реакції глядачів та критиків на різні твори мистецтва, а також вивчати вплив соціокультурних чинників на художній процес.

Наприклад, платформа Google Arts & Culture [7] надає можливість дослідження тисяч мистецьких творів, включаючи станковий живопис. «Хоча ми ще не досягли поворотного моменту, щоб спостерігати зміни, мистецтво проникає в цифровий простір, надаючи нові можливості для встановлення взаємодії між історією мистецтва, музеологією та самим мистецтвом» [4], — зазначає дослідник із Чиказького інституту мистецтва А. Чжан.

Одним із основних напрямів наукових досліджень у сфері аналізу станкового живопису є розробка та впровадження ефективних методів візуалізації. Використання ШІ, що базується на машинному навчанні, може бути застосовано для аналізу засобів виразності творів живопису, автоматизованого розпізнавання особливостей художнього стилю (епохи та індивідуального стилю художника), а також для порівняння творів за різними критеріями та ідентифікації їхніх характерних особливостей. Використання комп'ютерного бачення дає змогу автоматизувати процеси аналізу та розпізнавання образів, а також розкрити нюанси та елементи зображення, які можуть залишатися непоміченими для людського ока.

За допомогою технологій інтерактивних віртуальних аналізаторів та спеціалізованих програмних продуктів можна вивчати й інтерпретувати твори мистецтва в інтерактивному режимі. Вони надають можливість маркування та анотування окремих елементів творів, візуалізацію різних шарів зображення для подальшого дослідження та порівняння деталей, а також проведення спільної діяльності із дослідження творів мистецтва та обміну аналітичними даними між вченими. Платформи відкритого доступу до даних роблять наукові дослідження більш доступними та прозорими, що сприяє розширенню аудиторії та поглибленню розуміння різноманітності художньої спадщини.

У роботі «Нейронний алгоритм художнього стилю» в 2015 році дослідники Л.А. Гатіс, О.С. Еккер та М. Бетге запропонували новий підхід до створення художніх образів за допомогою згорткової нейронної мережі, що навчається [17]. Роком пізніше,

у статті «Передача стилю зображення за допомогою згорткових нейронних мереж» [18], вони демонструють значне наближення глибоких нейронних мереж до зорового сприйняття людини. Новий нейронний алгоритм художнього стилю, запропонований авторами, може розділяти зміст та стиль, результатом чого є створення високоякісних нових зображень, що комбінують зміст фотографії з художнім стилем відомих творів мистецтва. Дослідження проводилося на таких відомих творах, як «Корабетроща Мінотавра» Дж.М.В. Тернера (1805), «Зоряна ніч» В. Ван Гога (1889), «Крик» Е. Мунка (1893), «Сидяча оголена» П. Пікассо (1910), «Композиція VII» В. Кандинського (1913). Ці дослідження сприяли кращому розумінню можливостей глибоких нейронних мереж у створенні та обробці зображень.

Вже наступного року у роботі «Мультимодальна передача: ієрархічна глибока згорткова нейронна мережа для швидкої передачі художнього стилю» [19] Сін Ван та його колеги представляють новий підхід до передачі художніх стилів у зображеннях, що враховує проблему збереження стилю локалізованих областей при високій роздільній здатності. Авторі пропонують мультимодальну згорткову нейронну мережу, яка враховує канали кольору та яскравості, виконуючи стилізацію ієрархічно з кількома етапами збільшення масштабу. Їхні дослідження базувалися на зображеннях творів Томаса Кінга, Пабло Пікасо та інших відомих художників, які використовувалися з метою навчити ШІ розпізнавати стилі та генерувати зображення з фотографій у відповідних стилях, враховуючи кольорові та текстурні ознаки в різних масштабах. Це відкриває широкі перспективи для точнішого дослідження та віртуальної реконструкції творів мистецтва.

У статті «Автоматичне розпізнавання художнього стилю в живописі за допомогою глибокого навчання» [20], представлений на дев'ятій Азійській конференції з машинного навчання, досліджено застосування глибокої залишкової нейронної мережі для автоматичного розпізнавання художнього стилю у картинах. Авторі А. Лекутр, Б. Негревернь та Ф. Ігер вирішують завдання індексації великих баз даних творів станкового живопису, враховуючи, що художній стиль картини несе в собі не лише візуальну, а й історичну інформацію. Це сприяє підвищенню (у порівнянні з попередніми дослідниками)

ефективності розпізнавання художнього стилю, використовуючи набір даних Wikipaintings, який охоплює 25 різних стилів. Авторі використовують глибоку залишкову нейронну мережу, спочатку навчену на ImageNet, а потім перенавчену для розпізнавання художнього стилю. Емпірично доведено, що для досягнення оптимальної продуктивності потрібно перенавчити приблизно 20 шарів мережі. Дослідники стверджують, що стиль, виявлений у наборі даних Wikipaintings, узгоджується зі стилями, виявленими в інших незалежних наборах даних, і проводять ряд експериментів для підтвердження цього підходу як якісно, так і кількісно. Ця робота відкриває нові можливості для автоматичного розпізнавання художнього стилю в живописі за допомогою глибокого навчання.

Техніки комп'ютерного бачення та діджиталізації надають унікальні можливості для глибокого аналізу творів мистецтва, що відзначено в роботі А. Елгаммала й співавторів [21] «Вигляд історії мистецтва очима машини». Вони використовуються для розширення способів сприйняття та розуміння високорівневих аспектів творів мистецтва. Доведено, що комп'ютерні мережі здатні розпізнавати різні стилі, враховуючи композиційні особливості, світлотінь, колірну гаму, деталі мазків та поняття, пов'язані з об'єктом. Зв'язок між стилем Відродження, де переважає релігійна тематика, і сучасними стилями ХХ ст., такими як абстракція чи поп-арт, свідчить про те, що розрізнення ґрунтується на поняттях, пов'язаних з формою, як запропоновано відомих мистецтвознавцем Г. Вельфліном. Результати підкреслюють потенційну роль ШІ в аналізі творів живопису й важливість перегляду формальних методів мистецтвознавчого аналізу за допомогою інструментів комп'ютерного бачення та машинного навчання [21].

У статті «Досліджуючи репрезентативність художніх картин» [32], китайські вчені Й. Денг та інші розглядають оцінку живопису непрофесіоналами з точки зору його репрезентативності. За допомогою концепції репрезентативності можна кількісно оцінити ступінь відображення характеристик творчості художника в конкретному творі живопису. Вчені використовують новий підхід, який розширює інформацію про стиль зображення, враховуючи дані про авторство, час створення, а також аналізуючи конкретні особливості картин в одному фреймвор-

ку. Цей підхід допомагає користувачам краще зрозуміти творчі характеристики художників та легше класифікувати картини за іншими ознаками.

Проект «Art-ICT | Art Through the ICT Lens» [33] є спільною науковою ініціативою, фінансованою Науково-дослідною радою з прикладних і фізичних наук у Великобританії, яка об'єднує Університетський Коледж Лондона, Імперський Коледж Лондона та Національну Галерею. Метою є розробка автоматизованих інструментів, що поєднують дані макрорентгенівської флуоресценції (MA-XRF) [34] та гіперспектральні зображення (HSI), для підтримки технологічного дослідження, консервації та збереження художніх творів.

Серед досягнень проекту можна відзначити ідентифікацію пігменту за допомогою машинного навчання на прикладі картини «Персей і Андромеда» Тиціана (1554—1556 рр., Колекція Уоллеса, Лондон), виявлення прихованого під шарами живопису первісного підготовчого малюнка Леонардо да Вінчі, який був видозмінений автором, у праці С. Яна зі співавторами [35], а також розділення зображень на рентгенівських знімках двобічних творів живопису на дереві, таких як стулок Гентського вітваря авторства братів Ван Ейк.

Віншій статті тих самих авторів «Виявлення прихованих малюнків Леонардо у «Мадонні у скелях» за даними макрорентгенівського флуоресцентного сканування через локалізацію ліній елементів» [35], науковці розглядають використання MA-XRF для виявлення та картографування хімічних елементів у творах старих майстрів. Вони розробили новий метод, який автоматизує обробку даних MA-XRF, включаючи виявлення імпульсів у спектрі XRF та створення карт розподілу для кожного хімічного елемента на цифровому зображенні. Результати цього дослідження показують високу ефективність методу у виявленні навіть слабких або частково перекритих сигналів, що дає змогу візуалізувати раніше приховані деталі. Це дослідження викликало значний інтерес серед художників, науковців та широкої громадськості, оскільки воно відкриває нові можливості для розуміння і дослідження шедеврів минулого.

У статті «Коли де Проні зустрівся з Леонардо: автоматичний алгоритм вилучення хімічних елементів із даних макрорентгенівської флуоресценції» [34], С. Ян зі співавторами пропонують новий метод ав-

томатичного вилучення та ідентифікації хімічних елементів за даними MA-XRF. Цей підхід включає етапи попередньої обробки зображень та оцінки хімічних елементів. Ефективність методу була перевірена на наборах даних MA-XRF, отриманих із картин у колекції Національної галереї в Лондоні. Результати демонструють здатність підходу виявляти елементи зі слабкою інтенсивністю XRF та її зашумлені спектри, що сприяє візуалізації прихованих зображень у творах станкового живопису.

У дослідженні, здійсненому А. Бурашедом зі співавторами [36], розглянуто використання згортової нейромережевої передачі стилю для вирішення проблеми візуалізації підготовчих малюнків і «зображень-привидів» у творах живопису. Ці зображення, як правило, виявляються шляхом досліджень у рентгенівській або ІЧ зонах спектру, але отримують їх у відтінках сірого тону; за допомогою пропонувананих алгоритмічних методів можна відновлювати також і кольори «зображень-привидів», що сприяє кращому розумінню творчого методу художника.

Технології віртуальної та доповненої реальності дають змогу досліджувати твори мистецтва у віртуальному середовищі з відтворенням втрачених елементів або уявних просторів [37]. Особливо продуктивним є використання цих технологій у музейній практиці, де вони сприяють створенню інтерактивних експозицій для педагогічних та виставкових цілей. Наприклад, у дослідженні З. Хі та співавторів [23] досліджено вплив двох елементів дизайну доповненої реальності — типу інформації та розширення середовища (висока чи низька віртуальна присутність) — на музейний досвід туристів та їх готовність оплачувати ці нові застосунки.

Важливість розвитку віртуальних музеїв як альтернативного шляху доступу до мистецтва у зв'язку з пандемією COVID-19 розглянута дослідниками К. Майнеке зі співавторами у статті «На шляху до вдосконалення віртуальних музеїв шляхом контекстуалізації мистецтва через інтерактивні візуалізації» [24]. Автори вказують на недоліки поточних онлайн-турів, які мають недостатню інтерактивність, що ускладнює взаємодію відвідувачів з творами, представленими на виставках. На основі використання різних рівнів візуалізації здобуто новий віртуальний досвід, завдяки чому можна контексту-

алізувати оцифровані твори мистецтва з великих архівів зображень. Для цього використовується набір даних WikiArt з понад 200000 зображень, а також методи машинного навчання для отримання різноманітної інформації про зображені об'єкти та їх порівняння. Відвідувачі віртуального музею можуть досліджувати твори мистецтва за допомогою різних фільтрів та отримувати нові враження через інтерактивну візуалізацію. Описані результати були оцінені відвідувачами віртуального музею та підтвердили корисність запропонованої концепції.

У останні десятиліття галузь дослідження творів мистецтва переживає справжню цифрову революцію, як зазначає колектив з 13 авторів у статті «Виявлення та реконструкція прихованих або втрачених зображень у дослідженні мистецтва» [38]. Це стало можливим завдяки поліпшенню процесу оцифрування та отриманню зображень артефактів, виконаних за допомогою традиційних методів двовимірної візуалізації, а також через розширене використання новітніх методів спектроскопічної візуалізації. Різні техніки часто поєднуються для аналізу внутрішньої структури, стану збереження та історії консерваційної обробки мистецьких творів. Вони допомагають визначити матеріали, їх сполучення та розподіл, що розкриває методіку роботи художника та зміни, які відбулися з часом. Багато алгоритмічних проблем, що виникають у процесі обробки цих об'ємних даних, є унікальними та потребують спеціалізованих підходів для їх вирішення.

Використання методів ІКТ відкриває можливості для створення тривимірних моделей плоских творів живопису, що дає змогу експертам досліджувати їх з різних кутів зору та детально оглядати. Для прикладу, у проєкті «Rembrandt's Artwork in 3D» використано технології високоточного 3D-сканування для створення тривимірних моделей картин великого голландського майстра. Як пишуть С. Джонс зі співавторами, «використання 3D-моделей дає нам можливість переглядати твори Рембрандта як ніколи раніше, розкриваючи нові аспекти його майстерності» [39]. Доречним тут буде процитувати відомого модератора Сократівських діалогів у галузі консервації-реставрації Уільяма (Білла) Вея: «Визначення двої тривимірності не є строгим. Можна стверджувати, що картини з імпастро <...> також мають яскраво виражений тривимірний характер. Це особливо важ-

ливо для розуміння просторових аспектів та технічних вмінь художника» [40, р. 1]. Отже, використання ІКТ відкриває нові перспективи у дослідженні творчості Рембрандта, яка вважалася ґрунтовно вивченою. Такий поглиблений підхід допомагає виявити нові аспекти творчості майстрів, розкриваючи невідомі досі нюанси їх творів.

Висновки. Аналіз наукових досліджень свідчить про значний внесок ІКТ до сучасної технологічної та мистецтвознавчої експертизи й популяризації творів станкового живопису. Завдяки удосконаленню традиційних методів технологічної експертизи, а також впровадженню новітніх цифрових методів, як засвідчують результати багаторічних дослідницьких проєктів 2010-х — початку 2020-х років, вченим вдається отримувати нові важливі результати, які значно розширюють уявлення про застосовані матеріали й методи роботи художників, нинішній стан збереженості та історію побутування всесвітньо відомих творів станкового живопису. Комп'ютерне бачення та діджиталізація набувають значущості у мистецтвознавчій експертизі, завдяки впровадженню нових цифрових технологій для аналізу творів станкового живопису, за допомогою яких вчені можуть отримати більш глибоке розуміння структури, стилю та інших аспектів.

У сфері популяризації артефактів, що належать музеям, ІКТ сприяють вільному доступу до колекцій і тих творів, які перебувають у фондах, а також забезпечують постійний інтерес відвідувачів, завдяки різноманітним способам використання віртуальної та доповненої реальності, й широко залучені до освітніх проєктів та віртуальних експозицій. Високороздільні цифрові зображення, окрім того, що вони є важливі для дослідження різноманітних аспектів творів станкового живопису, є вдалим рішенням дилеми освітлення: експонування під точковими світильниками слабкої потужності, яке сприяє кращому збереженню артефактів.

Поряд із безсумнівними перевагами, існують і виклики, пов'язані з використанням ІКТ, такі як питання конфіденційності та безпеки даних.

Перспективи розвитку та вдосконалення інструментів ІКТ для завдань експертизи й популяризації творів станкового живопису становлять ключовий аспект подальших досліджень у цій сфері, тож важливим є їх поступове запровадження серед дослідників України.

1. Тимченко Т.Р. *Експертиза творів образотворчого мистецтва: живопис (історія та методологія): Навчальний посібник*. Київ: НАКККиМ, 2017. 120 с.
2. Цитович В.І. *Експертиза творів образотворчого мистецтва: живопис: (методологія та практика): Навчальний посібник*. Київ: НАКККиМ, 2018. 232 с.
3. Florea C., Gieseke F. Artistic movement recognition by consensus of boosted SVM based experts. *Journal of Visual Communication and Image Representation*. 2018. Vol. 56. P. 220—233. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2018.09.015>
4. Zhang A. The Narration of Art on Google Arts and Culture. *The Macksey Journal*. 2020. Vol. 1. № 1. Pp. 1—18. URL: <https://www.mackseyjournal.org/publications/vol1/iss1/149>
5. An efficient and scalable privacy preserving algorithm for big data and data streams. M.A.P. Chamikara et al. *Computers & Security*. 2019. Vol. 87. P. 101570. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cose.2019.101570>
6. Baig M.I., Shuib L., Yadegaridehkordi E. Big data adoption: State of the art and research challenges. *Information Processing & Management*. 2019. Vol. 56. № 6. P. 102095. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ipm.2019.102095>
7. Google Arts & Culture. *Google Arts & Culture*. URL: <https://artsandculture.google.com>
8. Pappas M., Pitas I. Digital color restoration of old paintings. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2000. Vol. 9. № 2. P. 291—294. URL: <https://doi.org/10.1109/83.821745>
9. Stanco F., Gallo G., Battiato S. *Digital Imaging for Cultural Heritage Preservation: Analysis, Restoration, and Reconstruction of Ancient Artworks*. Taylor & Francis Group, 2017. 523 p.
10. Cucci C., Picollo M., Vervat M. Trans-illumination and trans-irradiation with digital cameras: Potentials and limits of two imaging techniques used for the diagnostic investigation of paintings. *Journal of Cultural Heritage*. 2012. Vol. 13. № 1. P. 83—88. URL: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2011.07.002>
11. Digital image-based method to identify historical pigments in wall paintings. R. Sáez-Hernández et al. *Dyes and Pigments*. 2024. P. 111912. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2023.111912>
12. Garcia J.A., Yahaghi E., Movafeghi A. Improvement of the digital radiographic images of old paintings on wooden support through the anisotropic diffusion method. *Journal of Cultural Heritage*. 2021. Vol. 49. P. 115—122. URL: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2021.02.008>
13. Reflectance Imaging Spectroscopy (RIS) for Operation Night Watch: Challenges and Achievements of Imaging Rembrandt's Masterpiece in the Glass Chamber at the Rijksmuseum. F. Gabrieli et al. *Sensors*. 2021. Vol. 21. № 20. P. 6855. URL: <https://doi.org/10.3390/s21206855>
14. Artificial intelligence for art investigation: Meeting the challenge of separating x-ray images of the Ghent Altarpiece. Z. Sabetsarvestani et al. *Science Advances*. 2019. Vol. 5. № 8. P. eaaw7416. URL: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw7416>
15. Multi-Modal Dictionary Learning for Image Separation With Application in Art Investigation. N. Deligiannis et al. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2017. Vol. 26. № 2. P. 751—764. URL: <https://doi.org/10.1109/tip.2016.2623484>
16. Del Chiaro R., Bagdanov A.D., Del Bimbo A. Webly-supervised zero-shot learning for artwork instance recognition. *Pattern Recognition Letters*. 2019. Vol. 128. P. 420—426. URL: <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2019.09.027>
17. Gatys L.A., Ecker A.S., Bethge M.A. Image Style Transfer Using Convolutional Neural Networks. *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Las Vegas, NV; USA, 27—30 June 2016. 2016. URL: <https://doi.org/10.1109/cvpr.2016.265>
18. Gatys L., Ecker A., Bethge M.A. Neural Algorithm of Artistic Style. *Journal of Vision*. 2016. Vol. 16. № 12. P. 326. URL: <https://doi.org/10.1167/16.12.326>
19. Multimodal Transfer: A Hierarchical Deep Convolutional Neural Network for Fast Artistic Style Transfer. X. Wang et al. *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Honolulu, HI, 21—26 July 2017. 2017. URL: <https://doi.org/10.1109/cvpr.2017.759>
20. Lecoutre A., Négrevergne B., and Yger F. Recognizing Art Style Automatically in Painting with Deep Learning. *Proceedings of the Ninth Asian Conference on Machine Learning*, PMLR 77. Pp. 327—342. Nov. 2017. URL: <http://proceedings.mlr.press/v77/lecoutre17a/lecoutre17a.pdf>
21. The Shape of Art History in the Eyes of the Machine. A. Elgammal et al. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 2018. Vol. 32. № 1. Pp. 2183—2191. URL: <https://doi.org/10.1609/aaai.v32i1.11894>
22. Foka A. Computer Vision Applications for Art History: Reflections and paradigms for future research. *Proceedings of EVA London 2021*. 2021. URL: <https://doi.org/10.14236/ewic/eva2021.12>
23. He Z., Wu L., Li X. When art meets tech: The role of augmented reality in enhancing museum experiences and purchase intentions. *Tourism Management*. 2018. Vol. 68. P. 127—139. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2018.03.003>
24. Meinecke C., Hall C., Jänicke S. Towards Enhancing Virtual Museums by Contextualizing Art through Interactive Visualizations. *Journal on Computing and Cultural Heritage*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1145/3527619>
25. Unraveling the Composition of Rembrandt's Impasto through the Identification of Unusual Plumbonacrite by Multimodal X-ray Diffraction Analysis. V. Gonzalez et al. *Angewandte Chemie International Edition*. 2019. Vol. 58. № 17. P. 5619—5622. URL: <https://doi.org/10.1002/anie.201813105>

26. Castelli P.R. The secret of Rembrandt's '3D' technique revealed. *IBSA Foundation for scientific research*. URL: <https://www.ibsafoundation.org/en/blog/the-secret-of-rembrandts-3d-technique-revealed>
27. Laser cleaning of paintings: in situ optimization of operative parameters through non-invasive assessment by optical coherence tomography (OCT), reflection FT-IR spectroscopy and laser induced fluorescence spectroscopy (LIF). P. Moretti et al. *Heritage Science*. 2019. Vol. 7. № 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s40494-019-0284-8>
28. Depth-resolved analysis of historical painting model samples by means of laser-induced breakdown spectroscopy and handheld X-ray fluorescence. E. Pošpišilová et al. *Spectrochimica Acta. Part B: Atomic Spectroscopy*. 2018. Vol. 147. P. 100—108. URL: <https://doi.org/10.1016/j.sab.2018.05.018>
29. Андріанова О.Б., Біскулова С.О., Живкова О.В. et al. *Наука. Мистецтво. Студії. Освіта. Технологічні дослідження творів мистецтва з колекції Музею Ханенків*. Київ: Фенікс, 2019. 42 с.
30. Андріанова О.Б., Біскулова С.О., Перевальський В.Є. et al. *Наука. Мистецтво. Студії. Освіта. Технологічні дослідження творів європейської графіки з колекції Музею Ханенків*. Київ: Фенікс, 2020. 60 с.
31. Evaluation of the veracity of one work by the artist Di Cavalcanti through non-destructive techniques: XRF, imaging and brush stroke analysis. E.A.M. Kajiya et al. *Radiation Physics and Chemistry*. 2014. Vol. 95. P. 373—377. URL: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2013.03.027>
32. Exploring the Representativity of Art Paintings. Y. Deng et al. *IEEE Transactions on Multimedia*. 2020. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/tmm.2020.3016887>
33. *ARTICT — home*. *GitHub Pages*. URL: <https://artict.github.io/artict/home.html>
34. When de Prony Met Leonardo: An Automatic Algorithm for Chemical Element Extraction From Macro X-Ray Fluorescence Data. S. Yan et al. *IEEE Transactions on Computational Imaging*. 2021. Vol. 7. P. 908—924. URL: <https://doi.org/10.1109/tci.2021.3102820>
35. Revealing Hidden Drawings in Leonardo's 'the Virgin of the Rocks' from Macro X-Ray Fluorescence Scanning Data through Element Line Localisation. S. Yan et al. *ICASSP 2020—2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. Barcelona, Spain, 4—8 May 2020. 2020. URL: <https://doi.org/10.1109/icassp40776.2020.9054460>
36. Recovery of underdrawings and ghost-paintings via style transfer by deep convolutional neural networks: A digital tool for art scholars. A. Bourached et al. *Electronic Imaging*. 2021. Vol. 2021. № 14. P. 42-1—42-10. URL: <https://doi.org/10.2352/issn.2470-1173.2021.14.sva-042>
37. Миколайчук А. Технологічні інновації у вивченні та збереженні культурної спадщини: застосування віртуальної та доповненої реальності. *Education and science of today: intersectoral issues and development of sciences*. Chair Т. Тимченко. 2024. URL: <https://doi.org/10.36074/logos-29.03.2024.128>
38. Revealing and Reconstructing Hidden or Lost Features in Art Investigation. B. Sober et al. *IEEE BITS the Information Theory Magazine*. 2022. P. 1—16. URL: <https://doi.org/10.1109/mbits.2022.3207125>
39. Understanding multispectral imaging of cultural heritage: Determining best practice in MSI analysis of historical artifacts. C. Jones et al. *Journal of Cultural Heritage*. 2020. Vol. 45. P. 339—350. URL: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.03.004>
40. Wei W. *Innovative technology in art conservation*. 2023. URL: doi: <https://doi.org/10.4324/9781003217800>

REFERENCES

- Tymchenko, T.R. (2017). *Artistic Works Expertise: Painting (History and Methodology): Educational Manual*. Kyiv: National Academy of Culture and Arts Management [in Ukrainian].
- Tsytovysh, V.I. (2018). *Artistic Works Expertise: Painting (Methodology and Practice): Educational Manual*. Kyiv: National Academy of Culture and Arts Management [in Ukrainian].
- Florea, C., & Gieseke, F. (2018). Artistic Movement Recognition by Consensus of Boosted SVM Based Experts. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 56, 220—233. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2018.09.015>
- Zhang, A. (2020). The Narration of Art on Google Arts and Culture. In: *The Macksey Journal* (Vol. 1, issue 1). Retrieved from: <https://www.mackseyjournal.org/publications/vol1/iss1/149/>
- Chamikara, M. a. P., Bertok, P., & Liu, D. (2019). An efficient and scalable privacy preserving algorithm for big data and data streams. *Computers & Security*, 87, 101570. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.cose.2019.101570>
- Baig, M.I., Shuib, L., & Yadegaridehkordi, E. (2019). Big data adoption: State of the art and research challenges. *Information Processing and Management*, 56 (6), 102095. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.ipm.2019.102095>
- Google Arts & Culture. (N. d.). Google Arts & Culture. Retrieved from: <https://artsandculture.google.com/>
- Pappas, M., & Pitas, I. (2000). Digital color restoration of old paintings. *IEEE Transactions on Image Processing*, 9 (2), 291—294. Retrieved from: <https://doi.org/10.1109/83.821745>
- Stanco, F., Battiato, S., & Gallo, G. (2017). Digital Imaging for Cultural Heritage Preservation. In: *CRC Press eBooks*. Retrieved from: <https://doi.org/10.1201/b11049>
- Cucci, C., Picollo, M., & Vervat, M. (2012). Trans-illumination and trans-irradiation with digital cameras: Potentials and limits of two imaging techniques used for the diagnostic investigation of paintings. *Journal of Cultural Heritage*, 13 (1), 83—88. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2011.07.002>
- Saez-Hernandez, R., Cervera, M.L., & Morales-Rubio, A. et al. (2024). Digital Image-Based Method to Identify Hi-

- historical Pigments in Wall Paintings. *Dyes and Pigments*, 222, 111912. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2023.111912>
- Гарсна, J. a. M., Yahaghi, E., & Amir, M. (2021). Improvement of the Digital Radiographic Images of Old Paintings on Wooden Support through the Anisotropic Diffusion Method. *Journal of Cultural Heritage*, 49, 115—122. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2021.02.008>
- Gabrieli, F., Delaney, J.K., Erdmann, R.G., & et. al. Reflectance Imaging Spectroscopy (RIS) for Operation Night Watch: Challenges and Achievements of Imaging Rembrandt's masterpiece in the glass Chamber at the Rijksmuseum. *Sensors*, 21(20), 6855. Retrieved from: <https://doi.org/10.3390/s21206855>
- Sabetsarvestani, Z., Sober, B., Higgitt, C., & et al. (2019). Artificial intelligence for art investigation: Meeting the challenge of separating x-ray images of the Ghent Altarpiece. *Science Advances*, 5 (8). Retrieved from: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw7416>
- Deligiannis, N., Mota, J.F.C., Cornelis, B., & et al. (2017). Multi-Modal Dictionary learning for image separation with application in art investigation. *IEEE Transactions on Image Processing*, 26 (2), 751—764. Retrieved from: <https://doi.org/10.1109/tip.2016.2623484>
- Del Chiaro, R., Bagdanov, A.D., & Del Bimbo, A. (2019). Webly-Supervised Zero-Shot Learning for Artwork Instance Recognition. *Pattern Recognition Letters* (Vol. 128, pp. 420—426). Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2019.09.027>
- Gatys, L.A., Ecker, A.S., & Bethge, M. (2016). Image Style Transfer Using Convolutional Neural Networks. *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Retrieved from: <https://doi.org/10.1109/cvpr.2016.265>
- Gatys, L.A., Ecker, A., & Bethge, M. (2015). A Neural Algorithm of Artistic Style. *Journal of Vision*, 16 (12), 326. Retrieved from: <https://doi.org/10.1167/16.12.326>
- Wang, X., Oxholm, G., Zhang, D., & Wang, Y. (2017). Multimodal Transfer: A Hierarchical Deep Convolutional Neural Network for Fast Artistic Style Transfer. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Retrieved from: <https://doi.org/10.1109/cvpr.2017.759>
- Lecoutre, A., Negrevergne, B., & Yger, F. (2017). Recognizing Art Style Automatically in Painting with Deep Learning. *Proceedings of the Ninth Asian Conference on Machine Learning, PMLR 77*, 327—342. Retrieved from: <http://proceedings.mlr.press/v77/lecoutre17a/lecoutre17a.pdf>
- Elgammal, A., Mazzone, M., Liu, B., & et al. (2018). The shape of art history in the eyes of the machine. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 32 (1). Retrieved from: <https://doi.org/10.1609/aaai.v32i1.11894>
- Foka, A.F. (2021). Computer Vision Applications for Art History: Reflections and Paradigms for Future Research. *BCS Learning & Development*. Retrieved from: <https://doi.org/10.14236/ewic/eva2021.12>
- He, Z., Wu, L., & Li, X. (2018). When art meets tech: The role of augmented reality in enhancing museum experiences and purchase intentions. *Tourism Management*, 68, 127—139. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2018.03.003>
- Meinecke, C., Hall, C.M., & Janicke, S. (2022). Towards Enhancing Virtual Museums by Contextualizing Art through Interactive Visualizations. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 15 (4), 1—26. Retrieved from: <https://doi.org/10.1145/3527619>
- Gonzalez, V., Cotte, M., Wallez, G., & et al. (2019). Unraveling the Composition of Rembrandt's Impasto through the Identification of Unusual Plumbonacrite by Multimodal X-ray Diffraction Analysis. *Angewandte Chemie International Edition*, 58 (17), 5619—5622. Retrieved from: <https://doi.org/10.1002/anie.201813105>
- Castelli, P.R. (n. d.). The secret of Rembrandt's "3D" technique revealed. *IBSA Foundation for scientific research*. Retrieved from: <https://www.ibsafoundation.org/en/blog/the-secret-of-rembrandts-3d-technique-revealed>
- Moretti, P., Iwanicka, M., Melessanaki, K., & et al. (2019). Laser cleaning of paintings: in situ optimization of operative parameters through non-invasive assessment by optical coherence tomography (OCT), reflection FT-IR spectroscopy and laser induced fluorescence spectroscopy (LIF). *Heritage Science*, 7 (1). Retrieved from: <https://doi.org/10.1186/s40494-019-0284-8>
- Pospisilova, E. (Ed.). (2018). Depth-resolved analysis of historical painting model samples by means of laser-induced breakdown spectroscopy and handheld X-ray fluorescence. *Spectrochimica Acta. Part B: Atomic Spectroscopy*, 147, 100—108. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.sab.2018.05.018>
- Andrianova, O.B., Biskulova, S.O., Zhyvkova, O.V., & et al. (2019). *Science. Art. Studies. Education. Technological research of artworks from the Hanenko Museum collection*. Kyiv: Feniks [in Ukrainian].
- Andrianova, O.B., Biskulova, S.O., Pereval'skyi, V.Ye., & et al. (2020). *Science. Art. Studies. Education. Technological Research of European Graphics from the Collection of the Khanenki Museum*. Kyiv: Feniks [in Ukrainian].
- Kajija, E., Campos, P., Rizzutto, M.A., & et al. (2014). Evaluation of the Veracity of One Work by the Artist Di Cavalcanti through Non-Destructive Techniques: XRF, Imaging and Brush Stroke Analysis. *Radiation Physics and Chemistry*, 95, 373—377. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2013.03.027>
- Deng, Y., Tang, F., Dong, W., & et al. (2021). Exploring the Representativity of Art Paintings. *IEEE Transactions on Multimedia*, 23, 2794—2805. Retrieved from: <https://doi.org/10.1109/tmm.2020.3016887>
- ARTICT — home. (n. d.). Retrieved from: <https://art-ict.github.io/artict/home.html>
- Yan, S., Huang, J., Daly, N., & et al. (2021). When de Prony Met Leonardo: An Automatic Algorithm for Chemical Element Extraction From Macro X-Ray Fluorescence Data.

- IEEE Transactions on Computational Imaging*, 7, 908—924. <https://doi.org/10.1109/tci.2021.3102820>
- Yan, S., Huang, J., Daly, N., & et. al. (2020). Revealing Hidden Drawings in Leonardo's 'The Virgin of the Rocks' from Macro X-Ray Fluorescence Scanning Data through Element Line Localisation. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. Retrieved from: <https://doi.org/10.1109/icassp40776.2020.9054460>
- Bourached, A., Cann, G., Griffiths, R., & Stork, D.G. (2021). Recovery of underdrawings and ghost-paintings via style transfer by deep convolutional neural networks: A digital tool for art scholars. *arXiv (Cornell University)*. Retrieved from: <http://arxiv.org/pdf/2101.10807.pdf>
- Mykolaichuk, A.R. (2024). Technological Innovations in the Study and Preservation of Cultural Heritage: Application of Virtual and Augmented Reality. «ЛіХОУ» with the Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference «Education and Science of Today: Intersectoral Issues and Development of Sciences» (29.03.2024; Cambridge; UK), 598—599. Retrieved from: [https://archive.logos-science.com/index.php/conference-proceedings/issue/view/21\[in Ukrainian\]](https://archive.logos-science.com/index.php/conference-proceedings/issue/view/21[in%20Ukrainian]).
- Sober, B., Bucklow, S., Daly, N., & et. al. (2022). Revealing and reconstructing hidden or lost features in art investigation. *IEEE BITS the Information Theory Magazine* (Pp. 1—16). Retrieved from: <https://doi.org/10.1109/mbits.2022.3207125>
- Jones, C., Duffy, C., Gibson, A., & Terras, M. (2020). Understanding multispectral imaging of cultural heritage: Determining best practice in MSI analysis of historical artefacts. *Journal of Cultural Heritage*, 45, 339—350. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.03.004>
- Wei, W. (2023). *Innovative technology in art conservation*. Retrieved from: <https://doi.org/10.4324/9781003217800>