

Довжук О. М., старший викладач (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне,
o.m.dovzhuk@nuwm.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-3725-6232>)

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ АРХІТЕКТУРИ: ЗБЕРЕЖЕННЯ 3D-МОДЕЛЕЙ ОБ'ЄКТІВ КУЛЬТУРНОЇ СПАДЩИНИ В ЦИФРОВИХ АРХІВАХ БІБЛІОТЕК УКРАЇНИ

У статті проведено аналіз форматів для довгострокового зберігання файлів 3D-моделей будівель та об'єктів культурної спадщини, отриманих шляхом технологій тривимірного (3D) сканування, а також фотограмметричних методів для їх збереження та відновлення в майбутньому. Запропоновано впровадження стандартизованого формату файлу для зберігання і використання цих даних.

Ключові слова: формат файлу; 3D; архітектура; САПР; культурна спадщина; збереження; пам'ятка; бібліотека; архів.

Вступ. Розвиток технологій тривимірного сканування та фотограмметрії сприяв створенню точних 3D-моделей історичних та археологічних пам'яток в цифровому вигляді. В архітектурі тривимірне сканування та фотограмметрія застосовується з метою вивчення і реставрації будівель насамперед тих, які мають історичне значення.

Для збереження і використання таких моделей необхідно підготувати цифрову 3D-модель для довготермінового зберігання в цифрових архівах. Нині існує безліч програм для 3D-моделювання, в яких можна створити 3D-модель, тому не важливо, в якій саме програмі створювати модель, головне, щоб вона була «прочитана» на цифрових носіях через десятки років і прийнята 3D-принтерами для друку. Для цього модель потрібно експортувати в «open source» формат. Цей формат має бути універсальним, популярним і незалежним, підтримуватися всіма 3D-принтерами, швидким при обчисленні і максимально малим за розміром для збереженої моделі.

Аналіз останніх досліджень. Існують сотні форматів 3D-файлів. Це пов'язано з тим, що кожен розробник програмного CAD забезпечення має власний, оптимізований саме під їх софт, формат

файлів. Наприклад, використовувачи AutoCad, працюємо з файлами DWG, а якщо Blender – з файлами BLEND [1]. Це є патентовані формати файлів, які були створені виключно для використання в цих програмах. Якщо спробувати відкрити патентований файл в іншій програмі – отримаємо повідомлення про помилку. Файл відформатований і закодований таким чином, щоб його можна було відкрити тільки за допомогою програми, яка його створила.

Також варто врахувати, що «приватні» файли в САПР не можуть бути відкриті в попередніх версіях. Відкриття старого файлу в новішій версії, робить його недоступним для відкриття в старій версії (вони не мають зворотної сумісності), і це важливий фактор при прийнятті рішення про те, чи слід підтримувати поточну версію програми. Максимум, що пропонує програма це зберегти файл у форматі попередньої версії. Але, коли необхідно конвертувати великий обсяг файлів, створених в новішій версії ніж поточна, то перезберігати кожен файл вручну копівка і мало ефективна справа, тому використання даних форматів файлів є незручним в масовому обміні інформацією.

Виходом з такої ситуації є використання непатентованих або універсальних вільних форматів файлів. На сьогодні в більшості програм для 3D-моделювання є можливість імпорту та експорту популярних універсальних форматів. Крім того, більшість програм також підтримують можливість роботи з форматами від окремих виробників, які стали настільки поширеними, що ігнорувати їх просто не можна.

Непатентовані або вільні формати файлів САПР корисні, коли потрібно обмінюватися документами з зовнішніми джерелами, особливо в мережі Інтернет.

Однак не всі універсальні формати 3D-файлів зберігають всю потрібну інформацію про 3D-модель. Наприклад, формат STL зберігає тільки інформацію про геометрію й ігнорує інші дані 3D-моделі.

Так, восени 2019 року робоча група з питань цифрового моделювання, візуалізації та друку Бібліотеки Конгресу США запустила пілотну програму, в рамках якої обмежений вибір предметів з онлайн-колекцій був сканований в 3D, а тривимірні моделі стали загальнодоступними. Група змогла створити, наприклад, тривимірні моделі бронзового лиття руки президента Авраама Лінкольна (рис. 1) та рукопису 12 століття. Окрім перегляду 3D-моделей в інтернеті, користувачі можуть завантажувати **STL-**

файли, які потім можна використовувати для створення 3D-відбитків цих об'єктів [2] (рис. 2). Цей проєкт активно розвивається й сьогодні.



Рис. 1. Тривимірна модель
бронзового лиття руки президента
Авраама Лінкольна



Рис. 2. 3D-відбиток об'єкта,
створений з допомогою STL-файлу

Більше того, більшість 3D-моделей для друку, які можна знайти в інтернеті, мають формат файлу STL. Існування цієї екосистеми в поєднанні з інвестиціями в програмне забезпечення на основі формату STL, зроблене виробниками 3D-принтерів, призвело до великої бази користувачів, яка вкладала значні кошти в цей формат. Це означає, що існує безліч сторонніх програм, які працюють з файлами STL, що не належать до інших форматів файлів [3].

Досліджуючи дане питання бачимо, що тенденція використання формату STL знайшла своє втілення в багатьох цифрових проєктах. В інтернеті існує безліч репозиторіїв, торгових майданчиків і пошукових систем, що містять буквально мільйони безкоштовних файлів STL.

Але формат файлу STL не може зберігати додаткову інформацію, таку як метадані, колір, матеріал граней або трикутників 3D моделі. Він зберігає тільки інформацію про вершини і вектори нормалі. Це означає, що якщо нам потрібно використовувати кілька кольорів або кілька матеріалів для наших відбитків, то формат файлу STL не є правильним вибором.

Причина, по якій формат файлу STL не містить інформацію про

колір, проста. По-перше, коли швидке прототипування розвинулося в 1980-х роках, ніхто не замислювався про кольоровий друк. Сьогодні матеріали і процеси 3D-друку швидко розвиваються [3]. Точність друкарських процесів зараз досягає мікронної точності. Оскільки STL є приблизним форматом, для досягнення цієї роздільної здатності йому потрібні дуже маленькі тригранні грані, що створює величезні та громіздкі файли. По-друге, зараз багато 3D-принтерів дозволяють друкувати в повнокольоровому режимі – технології, яка, як очікується, стане більш розповсюдженою найближчим часом. Оскільки формат STL не може кодувати інформацію про колір тоді використання його з точки зору інформативності є неповним. З цих причин панування формату STL над світом 3D-друку може тривати недовго, і такі формати, як OBJ, 3MF або AMF, можуть найближчим часом його замінити.

Файли можуть зберігатися і синхронізуватися на комп'ютерах, серверах і хмарних сховищах для миттєвого доступу в інтернеті. Тривимірні моделі, включені до цифрового архіву історичної спадщини, стають доступні для подальшого використання і дають можливість студентам, архітекторам, будівельникам, історикам і краєзнавцям здійснювати дослідження пам'яток архітектури, їх реставрацію та реконструкцію в майбутньому. Тому від правильності вибору формату файла для збереження віртуальної цифрової історико-культурної спадщини залежить побудова моделей навіть невеликих об'єктів високої роздільної здатності, таких як геометричні мікроліти – мініатюрні кам'яні інструменти. Під час оцифрування таких об'єктів археологу важливо зберігати деталі настільки ж важливі, як переробка та сліди макрозносу [4].

При аналізі цього питання варто виділити роботу [5], у якій висвітлено різні питання та рішення для довгострокового архівування, індексації та пошуку колекцій тривимірних моделей у цифровому вигляді. Однак, варто зазначити, що сьогодні відсутні затверджені Міжнародні стандарти зі збереження цифрових даних, які могли б зберігатись десятки років з можливістю перетворення старих форматів файлів в нові і постійною актуалізацією даних цих 3D-моделей.

Головним напрямом досліджень є пошук універсального рішення для збереження цифрової інформації про 3D-модель в довгостроковій перспективі з її подальшою актуалізацією даних в цифрових архівах і можливістю її імпорту й експорту в програми для роботи з САПР.

Методика дослідження. Методика дослідження ґрунтується на аналізі матеріалу попередніх публікацій стосовно використання методу збереження 3D-даних, для довгострокового архівування, індексації та пошуку колекцій тривимірних моделей у цифровому вигляді.

Аналіз наукових та теоретичних розробок у цій галузі пов'язаний безпосередньо із досягненнями у технологічній сфері, а також розробкою нових стандартів, документів і форматів, затверджених на міжнародному рівні, які дозволили б підвищити якість адитивних технологій.

Результати досліджень. Основне призначення 3D-файлу – зберігати інформацію про 3D-модель у вигляді звичайного текстового або бінарного файлу. По суті відбувається кодування інформації про геометрію, зовнішній вигляд, сцену і анімацію 3D-моделі. Геометрія моделі описує її форму. Зовнішній вигляд включає в себе кольори, текстури, матеріал і т.п. Під сценою мається на увазі розташування джерел освітлення, камер і периферійних об'єктів. Ну і анімація характеризує переміщення 3D-моделі.

Повноцінне рішення цього питання мало б гарантувати збереження всіх цих параметрів в закодованому файлі певного формату і в разі руйнування оригіналу, гарантувало б можливість відновлення прототипу цієї моделі з високою точністю, створюючи геометричні форми практично будь-яких розмірів і необмеженої складності в майбутньому, наприклад, за допомогою 3D-друку з використанням різних матеріалів.

На сьогодні такими прикладами найбільш поширених вільних форматів файлів, які містять повну інформацію про модель є формати: .OBJ, .DAE, .STEP та інші. Але проблема полягає ще і в тому, що файл, в якому збережена модель, повинен бути перевірений на помилки, які виникають в процесі створення і обробки моделі перед її збереженням, а також підтримуватись більшістю принтерів для 3D-друку. Цей аспект є важливим в плані правильності побудови самої моделі. В це поняття зазвичай включаються такі помилки, які пов'язані з полігональною поверхнею самої 3D-моделі при 3D-друці:

1. **Сітка «Mesh» з дірками** – проблема «незакритої» сітки. Основне правило 3D-моделювання – модель повинна бути «герметичною». Якщо утворюється дірка, це означає, що у якогось ребра не вистачає однієї грані, отже, модель не підходить для збереження і в подальшому для 3D-друку.

2. **Наявність внутрішніх полігонів.** Всередині моделі, наприклад всередині стінок, не повинно бути граней.

3. **Загальні ребра.** Помилка виникає, коли до одного ребра прикріплено більше двох полігонів. Кожне ребро в 3D-моделі повинно об'єднувати тільки дві суміжні грані.

4. **Співпадаючі ребра.** Виникають, коли два окремих ребра створені в одному і тому ж місці і при цьому не з'єднані, такі ребра повинні об'єднуватися в одне спільне ребро.

5. **Накладення полігонів.** Утворюється, коли створюється полігон поверх вже існуючого. Пересічні межі можуть дезорієнтувати слайсер – програму, яка по шарах переводить 3D-модель в керуючий код для 3D-принтера.

6. **Нульова товщина полігону.** Щоб уникнути такої помилки, необхідно переконатися в тому, що кожен полігон має задану товщину [6].

Як можна виправити стандартні помилки 3D-моделювання? Аналіз і виправлення моделі в ручному режимі є складним. Часто можна зіткнутися з помилками, які важко виправити. У таких випадках аналіз невдалих 3D-моделей вимагає великих зусиль і часу всіх, хто причетний до цього процесу.

На сьогоднішній день існують спеціалізовані програми, призначені для автоматичного пошуку і глибокого аналізу помилок в 3D-моделях, такі як Netfabb, Meshmixer та інші. За допомогою цих програм можна в автоматичному або ручному режимі здійснити аналіз поверхні, виправити виявлені в сітках помилки, виявити і видалити просторові колізії та багато іншого. Ці програми імпортують моделі форматів більшості доступних на ринку CAD-систем. Однак при експорті моделі в такі програми втрачається інформація про текстури, матеріали і т.п. І вихідним файлом, як правило, є формат файлу STL, який використовується для друку на більшості 3D-принтерів.

Протягом останніх трьох десятиліть формат STL (стеріолітографія) був галузевим стандартом для передачі інформації між програмами і обладнанням для адитивного виробництва. Але цей формат визначає тільки поверхневу структуру і не дозволяє передати кольоровість, складну структуру матеріалу і не підтримує високий дозвіл друку для мікронної точності і величезного числа трикутників, щоб підвищити плавність виробу. Сучасні 3D-принтери мають такі можливості і для їх реалізації потрібен був новий формат для 3D-друку [7].

Ситуація кардинально змінилась в 2013 році. Американське товариство з випробувань та матеріалів (ASTM) здійснило розробку і випуск формату AMF – відкритого формату, призначеного для уніфікованого рішення і для зберігання інформації про тривимірні об'єкти. Новий формат AMF (на основі XML) був розроблений для подолання розриву між САПР і сучасними аддитивними технологіями виробництва. Цей формат містить всю необхідну інформацію для друку об'ємних виробів, в тому числі про матеріали, кольори і внутрішню структуру.

Формат використовує трикутні сітки для опису поверхонь, незалежно від того, чи є вони вигнутими або неплоскими краями на тривимірних поверхнях. Кольори задаються з використанням значень RGBA. Формат є простим, масштабується, а також є сумісним з минулими і майбутніми версіями програм. Файли AMF можна переглядати і виправляти за допомогою безкоштовного кроссплатформенного додатка Autodesk Meshmixer.

Бурхливий розвиток технологій прототипування і 3D-друку вимагає і нових стандартів, документів і форматів, які дозволяють підвищити якість адитивних технологій. У березні 2020 року було опубліковано розроблений документ – **ISO / ASTM 52915: 2020** «Технічна специфікація для формату файлу адитивного виробництва (AMF) Версія 1.2», який дозволить розкрити весь потенціал адитивного виробництва. Оновлений і опублікований стандарт **ISO / ASTM 52915: 2020** описує формат AMF, який повинен задовольнити поточні та майбутні потреби адитивного виробництва. Формат файлу AMF приходить на заміну STL як більш розширений формат, що описує об'єкт таким чином, що будь-який 3D-принтер може побудувати його в міру своїх можливостей. AMF простий в реалізації і розумінні, масштабується і має хорошу продуктивність, а завдяки зворотній сумісності є можливість конвертації файлу STL [7].

Висновок. На жаль, галузеві стандарти в Україні є морально застарілими і потребують змін. Питання впровадження нових стандартів потребує сучасного підходу і нових рішень, що є ефективними і активно використовуються закордоном.

Розвиток цифрових ресурсів в Україні в бібліотеках і архівах почався нещодавно. Його доля значною мірою залежить від державного фінансування й корпоративних проєктів, які поки ще не знайшли поширення [8]. Провідне значення в цьому процесі мають взяти на себе національні бібліотеки країни для формування загальнонаціонального і світового ресурсу.

Оснoву націoнальнoгo цифрoвoгo рeпoзитoрiю України мae стaнoвити систeмa стaндaртiв для прeдстaвлeння цифрoвих об'єктiв i їхнiх мeтaдaних, єдинe для всiх цифрoвих рeсурсiв схoвищe тa спeціaлiзoвaний мoдуль рoзпoдiлeнoгo зaвaнтaжeння цифрoвих рeсурсiв чeрeз вeбiнтeрфeйс. Пoвиннa бути прийнятa цифрoвa iнфoрмaцiйнa стрaтeгiя крaїни, якa зaдeклaрує, щo цифрoвa iнфoрмaцiя тa мeрeжeвi тeхнoлoгiї є клoчoвими фaктoрaми eкoнoмiчнoгo зрoстaння i соціaльнoгo блaгoпoлуччя у XXI ст.

1. Ditya Chakravorty. All you need to know about 3D file formats. The Most Common 3D File Formats. URL: <https://all3dp.com/3d-file-format-3d-files-3d-printer-3d-cad-vrml-stl-obj> (дaтa звeрнeння: 10.02.2023). 2. Eileen Jakeway. Library's Collections Come to Life as 3D Models. URL: <https://blogs.loc.gov/thesignal/2020/01/librarys-collections-come-to-life-as-3d-models> (дaтa звeрнeння: 10.02.2023). 3. Чтo тaкoe фoрмaт фaйлa STL? URL: <https://getfab.ru/post/47261> (дaтa звeрнeння: 10.02.2023). 4. Кoцiубiвськa К., Бaрaнський С. 3D Мoдeлювaння при вiднoвлeннi iстoричo-кoльтурних цiннoстeй. URL: <http://infotech-soccult.knukim.edu.ua/article/view/206109/206272> (дaтa звeрнeння: 10.02.2023). 5. Paquet E., Viktor H. L. Long-term preservation of 3D cultural heritage data related to architectural sites. International Archives of CIPA. 2005. 6. Прaвилa 3D-мoдeлювaння для 3D-пeчaти. URL: <https://www.cubicprints.ru/tutorials/pravila-3d-modelirovaniya-dlya-3d-pechati> (дaтa звeрнeння: 13.02.2022). 7. Specification for additive manufacturing file format (AMF) Version 1.2. URL: <https://www.astm.org/f2915-20.html> (дaтa звeрнeння: 13.02.2023). 8. Рибaчoк О. Мультикoльтурнi цифрoвi рeсурси США, Кaнaдi тa Австрaлiї. *Наук. пр. Нац. б-ки України ім. В. І. Вернaдськoгo*. 2017. Вип. 46. С. 274–291.

REFERENCES:

1. Ditya Chakravorty. All you need to know about 3D file formats. The Most Common 3D File Formats. URL: <https://all3dp.com/3d-file-format-3d-files-3d-printer-3d-cad-vrml-stl-obj> (дaтa звeрнeння: 10.02.2023). 2. Eileen Jakeway. Library's Collections Come to Life as 3D Models. URL: <https://blogs.loc.gov/thesignal/2020/01/librarys-collections-come-to-life-as-3d-models> (дaтa звeрнeння: 10.02.2023). 3. Чтo тaкoe фoрмaт фaйлa STL? URL: <https://getfab.ru/post/47261> (дaтa звeрнeння: 10.02.2023). 4. Кoцiубiвськa К., Бaрaнський С. 3D Мoдeлювaння при вiднoвлeннi iстoричo-кoльтурних цiннoстeй. URL: <http://infotech-soccult.knukim.edu.ua/article/view/206109/206272> (дaтa звeрнeння: 10.02.2023). 5. Paquet E., Viktor H. L. Long-term preservation of 3D cultural heritage data related to architectural sites. International Archives of CIPA. 2005. 6. Прaвилa 3D-мoдeлювaння для 3D-пeчaти. URL: <https://www.cubicprints.ru/tutorials/pravila-3d-modelirovaniya-dlya-3d-pechati>

pechati (data zvernennia: 10.02.2023). **7.** Specification for additive manufacturing file format (AMF) Version 1.2. URL: <https://www.astm.org/f2915-20.html> (data zvernennia: 10.02.2023). **8.** Rybachok O. Multykulturni tsyfrovi resursy SShA, Kanady ta Avstralii. Nauk. pr. Nats. b-ky Ukrainy im. V. I. Vernadskoho. 2017. Vyp. 46. С. 274–291.

Dovzhuk O. M., Senior Lecturer (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

MODERN PROBLEMS OF ARCHITECTURE: PRESERVATION OF CULTURAL HERITAGE OBJECTS 3D MODELS IN LIBRARY DIGITAL ARCHIVES OF UKRAINE

The article provides an analysis of various file formats for long-term storage of 3D models of buildings and cultural heritage objects. The technologies of three-dimensional (3D) scanning and photogrammetric methods used to obtain these models are examined. The focus is primarily on the issues of data preservation and restoration in the future.

The analysis of file formats includes an overview of their advantages and disadvantages, support for geometric and texture data, compression, scalability, and compatibility with different software systems.

To ensure a unified and standardized system for data storage and utilization, the implementation of a specialized file format is proposed. This standardized format will facilitate convenient and efficient data exchange between different software systems and ensure their long-term preservation and restoration.

The article also formulates research tasks aimed at finding a universal solution for preserving digital information about 3D models in the long term. An important aspect is the ability to update data in digital archives and import/export them into computer-aided design (CAD) software programs.

Based on the conducted analysis and research, a concept of a national digital repository in Ukraine is proposed, which includes a system of standards for representing digital objects and metadata. This repository will serve as a single point of access to all digital resources and will have a specialized module for distributed loading of digital resources through a web interface.

The obtained research results are of great significance to the fields of architecture, cultural heritage, and other related domains involved in the preservation and restoration of cultural heritage objects. The development and use of a standardized file format will enhance data exchange, collaboration among different organizations, and provide convenient access to digital resources. Furthermore, the implementation of a national digital repository will contribute to the preservation and popularization of cultural heritage, as well as foster growth in scientific research and education.

***Keywords:* file format; 3D; architecture; CAD; cultural heritage; preservation; monument; library; archive.**
