

УДК 528.92

## ДОКУМЕНТУВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ АРХЕОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗАСОБАМИ ЦИФРОВОЇ ФОТОГРАМЕТРІЇ

**З. Кузик, А. Ставовий, Т. Ільків**

Національний університет “Львівська політехніка”

**Ключові слова:** археологічний розкоп, урбаністична археологія, цифрова фотограмметрія, стереофотограмметричний метод, фронтальний план, 3D-моделювання, обміри архітектурних деталей.

### Постановка проблеми

Основним завданням науки археології є пошук, знаходження, дослідження та документування матеріальних історичних і природних пам'яток, які залягають на глибині культурних шарів. Археологічні знахідки є достовірними артефактами, які проливають світло на становлення і розвиток суспільства та життєдіяльність людей у різні історичні періоди. Послідовність археологічних робіт полягає традиційно в попередньому історичному вивченні та аналізі місцевості, археологічній розвідці, пошуку та знаходженні археологічних об'єктів на розкопках, класифікації, датуванні й інтерпретації знахідок. Результати археологічних робіт стають експонатами музеїв та основою для подальших історичних досліджень.

Сучасна археологія істотно відрізняється від класичної, яка виникла в епоху Відродження, й інтенсивний розвиток якої припав на XIX – поч. XX ст. У світовій археологічній науці актуальним є комплексний науковий метод пізнання та інтеграція різних новітніх методик і технологій. Під час проведення археологічних робіт застосовують методи дистанційного зондування, зокрема радіометрію та лазерне сканування, геодезичне знімання, інфрачервоне і тепловізійне аерознімання, БПЛА, фотограмметричне знімання та опрацювання цифрових зображень стереофотограмметричним методом, моделювання археологічних об'єктів у спеціалізованих програмних продуктах. Автоматизація обмірів археологічних об'єктів істотно зменшує витрати часу під час проведення польових досліджень, полегшує тривалу ручну працю археологів, яким часто доводиться працювати в небезпечних та екстремальних умовах. Із застосуванням методів ДЗ зросли точність та оперативність археологічних робіт. Одночасно збільшились можливості цифрового камерального опрацювання зображень, змінилися методи документування, презентації та наукової звітності, розширилась географія археологічних досліджень. Сьогодні на зміну традиційному опису археологічних знахідок прийшов метод віртуального документування та моделювання об'єктів, а облік археологічних знахідок здійснюється за допомогою організації та управління базами даних пам'яток археології.

Археологічні об'єкти часто розташовані у важкодоступних місцях, у них складна довільна

конфігурація, пошкоджена або зруйнована поверхня. Виявлення, картографування та обміри пам'яток археології пов'язані зі значними затратами часу, фізичними зусиллями, залежать від сезонності та погодних умов. Археологічні об'єкти належать до класу “динамічні об'єкти”. До їх руйнування та незворотних втрат призводять такі фактори:

- погодні умови;
- сезонні процеси та стихійні явища;
- крадіжки “чорних археологів”;
- руйнування будівельною технікою.

У Законі України “Про збереження археологічної спадщини” прописано принципи наукового дослідження археологічних пам'яток, серед яких – “застосування, де це можливо, неруйнівних методів дослідження” [15]. На жаль, в Україні склалась така ситуація, коли з певних об'єктивних причин в археологічних дослідженнях сучасні методи дистанційного зондування застосовують рідко. Сумлінна, часто подвижницька праця археологів затьмарюється недосконалістю законодавства та людським фактором. По-перше, злочинністю “чорних” археологів, які заради власного збагачення відшукують археологічні цінності та нехтують збереженням культурної спадщини народу, по-друге, безкарністю недобросовісних забудовників, що призводить до незворотних втрат культурних нашарувань, по-третє, обмеженістю можливостей, а інколи й знань, для виконання комплексу археологічних досліджень за допомогою інтегрованих новітніх методик і технологій.

Мета статті – дослідження функціональних можливостей цифрової фотограмметрії, зокрема програмно-технологічного комплексу “цифрова фотограмметрична станція “Дельта” української фірми “Геосистема” для документування та моделювання археологічних пам'яток.

Об'єктом дослідження є залишки кам'яниці XV, XIX ст. в історичному центрі Львова, внесеної до списку світової культурної спадщини ЮНЕСКО.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

За класифікацією сучасних вчених археологію поділяють на п'ять видів [2]:

- *повітряна* (із застосуванням аерофотознімання);
- *підводна* (на глибині великих водойм);
- *урбаністична* (пошук та дослідження історичних нашарувань міст);
- *гірська* (виявлення та документування наскельних храмів, печер у горах тощо);
- *польова* (на відкритих рівнинних ділянках).

У світовій археологічній практиці є безліч прикладів використання безконтактного фотограмметричного знімання, переваги якого очевидні щодо швидкості, точності та безпечності обмірів віддалених, інколи важкодоступних археологічних об'єктів. Різні методики та особливості застосування аналітичної та цифрової фотограмметрії в археології описують у своїх працях відомі вчені-фотограмметристи К. Краус, П. Вальдгойзл, К. Павелка, Г. Пшибілла, П. Гриссенмейер та ін. [6, 11, 13, 14]. Новий етап розвитку археології розпочався наприкінці XX ст. із впровадженням технології наземного лазерного сканування [5, 6, 17]. Цієї теми стосується більшість публікацій у матеріалах міжнародних конференцій CIPA (Міжнародний комітет з фотограмметрії та архітектури) та ISPRS (Міжнародне товариство фотограмметрії та дистанційного зондування).

З ініціативи комісії Європейського Союзу розпочато проект "Електронна Європа". За повідомленням Б. Сміта [16], з 2002 р. проводяться широкомасштабні археологічні дослідження із застосуванням тривимірного знімання пам'яток за допомогою стереофотограмметрії, з реєстрацією та опрацюванням даних у польових умовах, оцифруванням великих і важкодоступних об'єктів. За Й. Ебертом, отримані дані передбачається використовувати у віртуальній археології для створення тематичних баз даних та реконструкції археологічних пам'яток [10].

Ознакою нашого часу є комплексний підхід до проведення археологічних досліджень, інтеграція та зберігання великого масиву гібридних даних у базах даних. Вирішення цієї проблеми пропонують М. Капоне, Р. Леттельєр, О. Кобос [8]. Методику великомасштабного картографування в урбаністичній археології за допомогою безпілотних літальних апаратів пропонують В. Островскі та К. Ганус [12]. Принципи 3D-моделювання музейних артефактів фотограмметричним методом та за допомогою панорамного макрознімання висвітлено в публікаціях П. Кліні, Н. Фрапечіні та ін. [9]. Створення мобільного додатка у віртуальному середовищі для аналізу археологічних об'єктів великих розмірів пропонують К. Баттіні, Е. Зорге [7]. На міждисциплінарності археологічних досліджень, комунікативній діяльності та ролі менеджменту і знань керівника проекту наголошують М. Сандер, Г. Пшибілла, Р. Штайгер [17].

Проблеми охорони та збереження археологічних пам'яток в Україні та порівняння з досвідом інших країн у цій сфері висвітлено у публікації Г. Івакіна [1]. Про важливість обмірів архітектурних деталей стародавніх зруйнованих споруд йдеться у працях вітчизняних науковців М. Сагайдака, Ю. Лукомського та В. Петрика [3]. Вагомий внесок у розвиток української археології зробив М. Рожко, запропонувавши концепцію існування наскельних оборонних фортець доби Київської Русі та виконавши комплексні дослідження і картографування пам'ятки археології – наскельного міста-фортеці Тустань [4]. Тривимірне

моделювання та документування цієї унікальної пам'ятки на основі аерофотознімків виконав В. Рожко [18].

### Виклад основного матеріалу досліджень

Документування об'єктів історико-культурної спадщини пов'язане зі зберіганням великого обсягу описової та графічної інформації, такої як карти, схеми, плани, фотознімки, рисунки тощо. Завдяки впровадженню сучасних методів і технологій безконтактного одержання інформації про археологічні об'єкти та інформаційних систем для зберігання, опрацювання інформації та управління нею змінились способи вимірювання, представлення та документування в археології. Найчастіше використовуваними сьогодні методами вимірювання і документування артефактів є геодезичний, фотограмметричний, аерофотознімання та лазерне сканування. Цифровий метод документування дає змогу зберігати великі обсяги різномірної інформації у базах даних та забезпечувати відображення її у віртуальному просторі.

Масштаби обмірних креслень, планів і окремих фрагментів, вимоги до повноти і точності їх складання визначають у технічному завданні залежно від призначення архітектурно-будівельних обмірів.

Міжнародний комітет з архітектурної фотограмметрії рекомендує використовувати класифікацію точності обмірних робіт, наведену в табл. 1.

Таблиця 1

### Класифікація точності обмірних робіт

| Тип вимірів  | Точність вимірів, мм |            | Масштаб |
|--------------|----------------------|------------|---------|
|              | Основні              | Другорядні |         |
| Високоточні  | 0,3–0,5              | 1–1,5      | 1:20    |
| Точні, II    | 1–2                  | 3–5        | 1:50    |
| Точні, III   | 3–5                  | 10–15      | 1:100   |
| Технічні, IV | 10–15                | 20–30      | 1:200   |
| Технічні, V  | 20–30                | 30–50      | 1:500   |

Для розроблення технічних проектів реставрації великих архітектурних ансамблів фронтальні плани складають у масштабах 1:100 і 1:200. Для виконання обмірних робіт на стадії робочих креслень плани споруд складають у масштабах 1:20, 1:50, обмірні креслення окремих фрагментів – у масштабі 1:10 або 1:5. Такі самі вимоги стосуються виконання обмірів археологічних об'єктів.

Фотограмметричне знімання проводили на археологічному розкопі у місті Львові за адресою: пл. Міцкевича, 9. Місце розташування археологічного об'єкта зображено на рис. 1.

Під час археологічних розкопок, які виконувала Рятівна археологічна служба Інституту археології НАН України у Львові, в цьому місці виявлено ряд кам'яних кладок, що стосуються фундаментів споруд, які існували від середини XIV ст. до XIX ст. включно.

У 1839 р. на цьому місці було збудовано будинок за проектом архітектора В. Шмідта (рис. 2). 120 років тому у ньому був магазин світильників Р. Дітмара, який першим у світі почав виробництво газової лампи, винайденої у Львові. В цьому ж будинку за Польщі містилися редакція газети, спортивний клуб, салон мод. Ще у 30-ті роки минулого століття тут містився Львівський союз артистів-пластиків, а в радянський час – Спілка художників. Будівлю знесено на початку 90-х років ХХ ст. як аварійну.

Запланований комплекс вимірювальних робіт з метою документування та моделювання урбаністичної пам'ятки археології фотограмметричним методом здійснювався у такій послідовності:

- попереднє обстеження об'єкта дослідження, визначення відстаней та величини базису;
- проектування та маркування опорних точок на об'єкті;
- попередній розрахунок оцінки точності вимірювання координат;
- тахеометричне знімання;
- знімання об'єкта цифровою камерою Canon EOS 350;
- фотограмметричне опрацювання цифрових зображень на ЦФС “Дельта” у програмі Models;
- викреслювання фронтального плану на ЦФС “Дельта” у програмі Digitals;
- 3D-моделювання об'єкта;
- обміри фрагментів та архітектурних деталей артефакта у стереорежимі;
- оцінювання точності графічних побудов.

На фотознімках (рис. 3) зображений археологічний розкоп, фрагмент досліджуваного об'єкта, процес маркування і тахеометричного знімання.

На об'єкт дослідження зі складною, крихкою і нерівною поверхнею нанесено регулярну мережу точок з кроком 20 см. За початок відліку зовнішньої системи координат вибрано нижній лівий кут на об'єкті досліджень. У результаті тахеометричного знімання одержано просторові координати 28 точок.

Фотограмметричне знімання виконувалось “з руки” цифровою камерою Canon EOS350, фокусна відстань  $f=18$  мм у “нормальному випадку знімання”; відстань до об'єкта  $Y=4$  м; базис фотографування  $B=0,5$  м. У знімки ведено поправку за дисторсію об'єктива.

Обчислена апріорна оцінка точності:  $m_x=6,2$  мм,  $m_y=12,7$  мм,  $m_z=8$  мм.

Із серії отриманих цифрових зображень відібрано дві стереопари для фотограмметричного опрацювання на ЦФС “Дельта”. У програмному модулі Models виконано внутрішнє та зовнішнє орієнтування зображень, в результаті чого отримано стереофотограмметричну модель.

Середню квадратичну помилку визначення елементів зовнішнього орієнтування для двох стереопар наведено у табл. 2.

Таблиця 2

### Оцінка точності визначення координат точок у стереофотограмметричній моделі

| Стереопара № 1 | Стереопара № 2 |
|----------------|----------------|
| DX 3 мм        | DX 3 мм        |
| DY 8 мм        | DY 7 мм        |
| DZ 4 мм        | DZ 4 мм        |

За допомогою графічних інструментів програмного модуля Digitals у стереорежимі викреслено фронтальні плани обидвох стереопар.

Як бачимо з рис. 4, фронтальний план з фотографічним зображенням в основі є інформативнішим, що дасть змогу археологам чи реставраторам краще аналізувати текстуру археологічного об'єкта, а не тільки його контурну частину. Аналогічно у стереомоделі викреслюємо фронтальний план для другої стереопари.

Сумішивши спільні контури на фронтальних планах, з першої та другої стереопар, одержуємо план всього археологічного об'єкта. На рис. 5 подано план пам'ятки археології, побудований стереофотограмметричним методом (чорним кольором позначено область першої стереопари, зеленим – другої стереопари, червоним – спільна область, зона суміщення контурів).

На рис. 6 подано фронтальний план об'єкта, викреслений на ЦФС у режимі одного знімка.

У стереофотограмметричній моделі (в режимі “стерео”) автоматично визначаються координати X, Y, Z усіх точок фронтального плану, а це дає змогу на основі масиву просторових координат створити векторну 3D-модель об'єкта та виконувати просторове моделювання. У режимі “моно” тривимірну модель побудувати неможливо. На рис. 7 наведено 3D-векторну модель археологічного об'єкта у програмному середовищі ЦФС “Дельта”; її можна повертати у віртуальному просторі навколо кожної з осей X, Y, Z за допомогою вказівника, детально обстежуючи важкодоступні графічні елементи об'єкта. У разі наведення на будь-яку точку моделі висвічуються її просторові координати.

Однією з можливостей цифрового представлення археологічного об'єкта у ПЗ Digitals є зумисне вирівнювання контурів та корекція пошкодженої текстури об'єкта, т. зв. “ідеалізація” форм. На рис. 8 відображено ідеалізований фронтальний план у режимі одного знімка. Таку модель можна застосовувати у реставраційних проектах на об'єктах з геометрично правильними та строгими формами.

Збирання контурів (точок, ліній, полігонів), окремих архітектурних деталей об'єкта оператор виконує стереоскопічно із застосуванням функції “Маркування точок”, а нумерацію точок, координати, відстані, довжини виділених контурів, кути повороту програма визначає автоматично.

На досліджуваному археологічному об'єкті виконано контурні обміри мурованих арок (рис. 9). Результати обмірів – координати X, Y, Z кожної точки та відстані між точками автоматично зберігаються у таблиці (рис. 10).

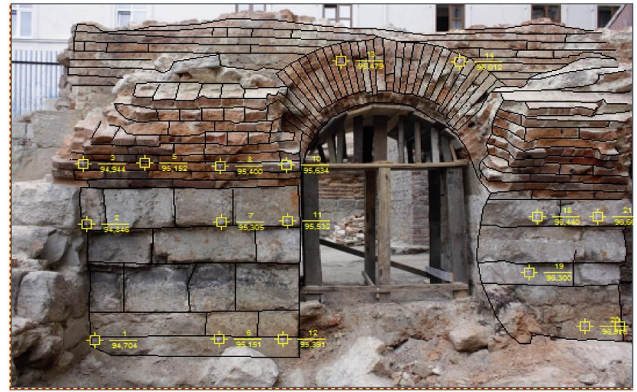
На рис. 11 показано контур другої арки і таблицю результатів обмірів відповідно.



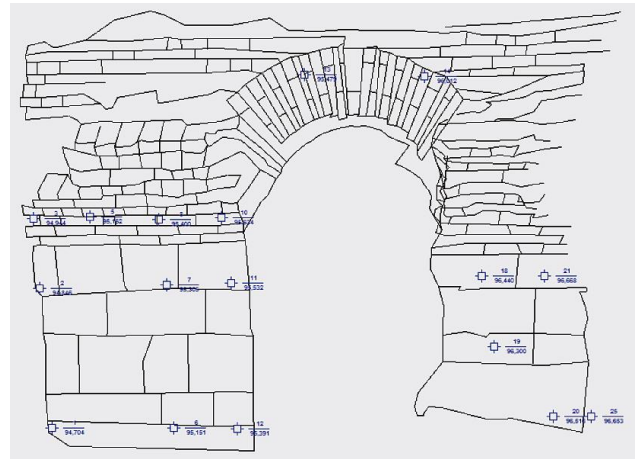
Рис. 1. Локалізація археологічного об'єкта, позначена на плані міста і на аерофотознімку



Рис. 2. Фото 50-х років ХХ ст.



а



б

Рис. 4. Фронтальний план (за першою стереопарою): а – з растром; б – без растрової основи



а

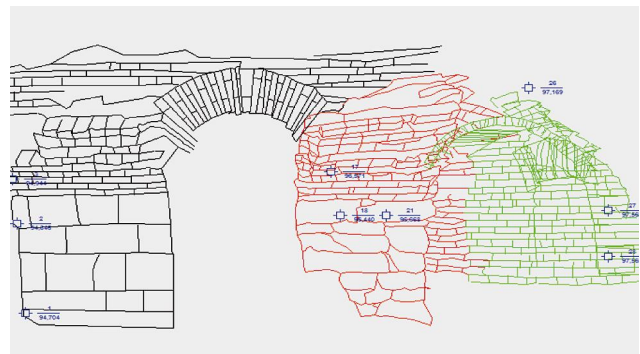


Рис. 5. Фронтальний план археологічного об'єкта в масштабі 1:25



б

Рис. 3. Маркування опорних точок (а); тахеометричне знімання об'єкта (б)

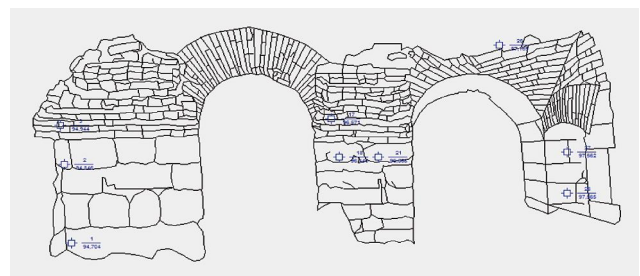


Рис. 6. Фронтальний план археологічного об'єкта, викреслений на ЦФС у монорежимі

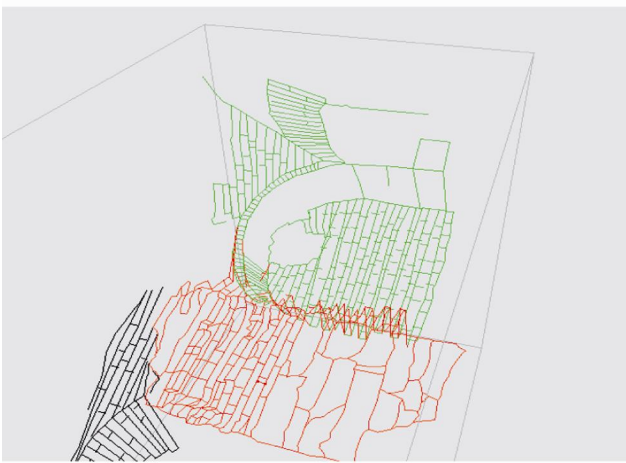
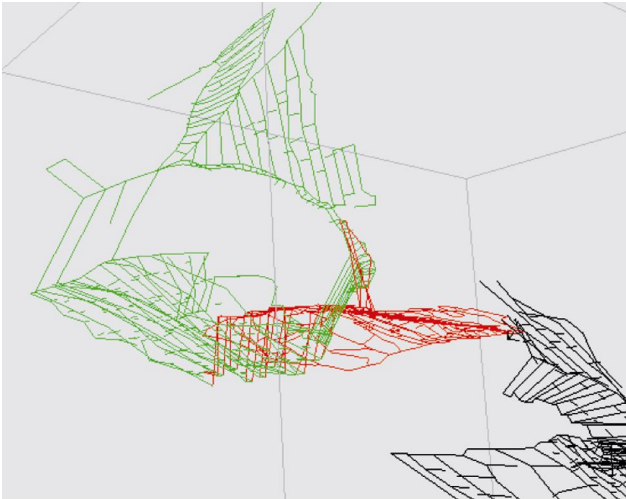


Рис. 7. Векторне 3D-моделювання археологічного об'єкта

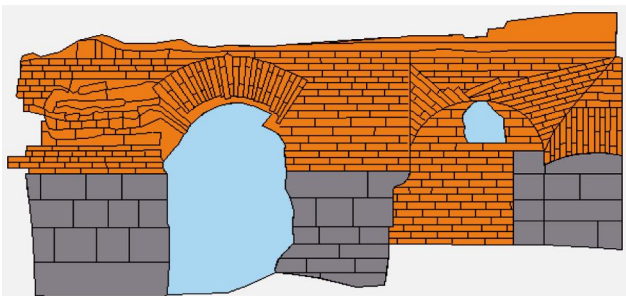


Рис. 8. Ідеалізований фронтальний план, створений у монорежимі



Рис. 9. Стереоскопічне маркування 1-го контуру – арки № 1 (контур позначено червоним кольором)



| №  | X       | Y       | Z    | Довж. |
|----|---------|---------|------|-------|
| 1  | 101,980 | 102,432 | 96,1 | 0,173 |
| 2  | 102,130 | 102,345 | 96,1 | 0,086 |
| 3  | 102,215 | 102,356 | 96,1 | 0,046 |
| 4  | 102,257 | 102,335 | 96,1 | 0,047 |
| 5  | 102,296 | 102,309 | 96,1 | 0,049 |
| 6  | 102,337 | 102,282 | 96,0 | 0,044 |
| 7  | 102,366 | 102,248 | 96,0 | 0,103 |
| 8  | 102,422 | 102,162 | 96,0 | 0,061 |
| 9  | 102,444 | 102,105 | 96,0 | 0,165 |
| 10 | 102,577 | 102,201 | 95,8 | 0,160 |
| 11 | 102,636 | 102,052 | 95,8 | 0,001 |

Рис. 10. Фрагменти контуру арки № 1 і таблиці обмірів



| № | X       | Y       | Z      | Довж. |
|---|---------|---------|--------|-------|
| 1 | 102,238 | 103,514 | 96,694 | 0,041 |
| 2 | 102,276 | 103,530 | 96,694 | 0,059 |
| 3 | 102,328 | 103,557 | 96,694 | 0,056 |
| 4 | 102,373 | 103,590 | 96,694 | 0,090 |
| 5 | 102,453 | 103,631 | 96,752 | 0,089 |
| 6 | 102,516 | 103,693 | 96,763 | 0,092 |
| 7 | 102,572 | 103,766 | 96,803 | 0,103 |
| 8 | 102,623 | 103,856 | 96,803 | 0,037 |

Рис. 11. Документування контуру арки № 2 стереофотограмметричним методом

### Висновки та рекомендації

Цифрова фотограмметрична станція “Дельта” та ПЗ “Digitals” має необхідний набір функціональних та інструментальних можливостей для відображення, документування і моделювання складних археологічних об'єктів та їх окремих елементів за даними наземного фотограмметричного знімання у стереоскопічному режимі, що істотно розширює можливості традиційної археології, методів документування, полегшує працю архітекторів і археологів на розкопках, оптимізує увесь комплекс археологічних досліджень.

Фронтальні плани і просторові моделі пам'ятки археології XIV ст., XIX ст. у Львові створено з високою точністю:  $m_x=3$  мм,  $m_y=8$  мм,  $m_z=4$  мм, що повністю задовольняє вимоги археологічних робіт та відповідає III класу точності вимірювання.

Експериментальні дослідження на археологічному розкопі виконано за згодою археологів Рятівної археологічної служби Інституту археології НАН України у Львові.

Завдяки застосуванню комплексних підходів з використанням високоточних сучасних фотограмметричних технологій розкриваються широкі можливості не тільки фіксації, оцінювання стану та моніторингу археологічних пам'яток неруйнівними дистанційними методами, але і можливість виявляти й ідентифікувати малоінформативні структури матеріальних залишків, створювати великомасштабні фронтальні плани, детальні цифрові моделі об'єктів, атрибутивні бази інтегрованих даних, інформаційні системи, а також використовувати отримані дані в реконструктивній і віртуальній археології.

#### Література

- Івакін Г. Ю. Проблеми охорони та збереження археологічних пам'яток в Україні // Вісн. НАН України. – 2013. – № 5. – С. 86–88.
- Кузик З. Застосування методів дистанційного зондування в археології // Геоінф. моніторинг навк. середовища: GNSS і GIS-технології: зб. матер. XVIII Міжнар. наук.-техн. симп., Алушта (Крим). – 2013. – № 25. – С. 219–223.
- Лукомський Ю. В. Архітектурно-археологічні дослідження втрачених архітектурних об'єктів (на прикладі пам'яток Галича XII–XIII ст.) / Ю. В. Лукомський, В. М. Петрик // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2010. – № 674. – С. 297–306.
- Рожко М. Ф. Тустань – давньоруська наскельна фортеця / М. Ф. Рожко. – К. : Наук. думка, 1996. – 240 с.
- Alby E., Elter R. Close range photogrammetry applied to the documentation of an archaeological site in Gaza strip, Palestine // Int. Arc. of the ISPRS and Spatial Information Sciences, Vol. XL-5/W2-XXIV International CIPA Symposium. – 2013, Strasbourg, France. – P. 19–24.
- Alby E., Grussenmeyer P. From point cloud to 3D model, modeling methods based on architectural knowledge applied to fortress of Chatel-Sur-Moselle // Int. Arch. of the ISPRS and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIX-B5. – XXII ISPRS Congress. – 2012, Melbourne, Australia. – P. 75–80.
- Battini K., Sorge E. Dynamic management of survey data and archaeological excavation the case study of the amphitheatre of Volterra // Scientific Research and Information Technology. – Vol. 6. Issue 2, 2016. – P. 119–132.
- Capone M. Urban archaeology: how to communicate a story of a site 3D reconstruction but not only // Int. Arch. of the ISPRS and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII-5/W16, Trento 2011. – P. 445–452.
- Clini P., Frapiccini N., Mengoni M. SFM Technologie and focus stacking for digital documentation of archaeological artifacts // isprs-archives-XLI-B5, doi:10.5194, 2016. – P. 229–236.
- Ebert J. Remote Sensing Applications in Archaeology // Advances in Archaeological Method and Theory. N. Y., 1984. – Vol. 1. – P. 293–362.
- Kraus K. Photogrammetrie, B. 1 / Berlin WdeGVerlag, 2004. – 488 p.
- Ostrowski W., Hanus K. Budget UAV systems for the prospection of small- and medium-scale archeological sites // isprs-arch-XLI-B1-971, 2016. – P. 971–977.
- Przybilla H.-J. Digitale Photogrammetrie – ein modernes Dokumentationsverfahren für die Archäologie. Grundlagen und Anwendungen // VDV-Schriftenreihe, B. 23, 2004. – P. 137–142.
- Šdina J, Pavelka K., Housarová E. Archeological documentation of a defunct Iraqi town // isprs-archives-XLI-B1-1031, 2016. – P. 512–519.
- [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/1626>
- [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://eva.rsl.ru/ru/2013/page/70>
- Przybilla H.-J., Staiger R. Messen und Dokumentieren in der Archäologie. Ein aktuelles Tätigkeitsfeld für den Geodäten? // FH-Bochum, 2015.
- [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/267413704>.
- [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://tustan.ua/3d-model-presentation/>

#### Документування та моделювання археологічних об'єктів засобами цифрової фотограмметрії

З. Кузик, А. Ставовий, Т. Ільків

Розглянуто питання дослідження та документування археологічних пам'яток. Підкреслено актуальність та можливості фотограмметрії та для вирішення завдань урбаністичної археології. За допомогою ЦФС “Дельта” створено фронтальні плани, 3D-моделі та виконано обміри архітектурних деталей.

#### Документирование и моделирование археологических объектов посредством цифровой фотограмметрии

З. Кузык, А. Ставовый, Т. Илькив

Рассмотрены вопросы исследования и документирования археологических объектов. Подчеркивается актуальность и возможности фотограмметрии для урбанистической археологии. С помощью ЦФС “Дельта” созданы фронтальные планы и 3D-модели, выполнены измерения архитектурных деталей.

#### Archaeological Documentation and Modelling with the Digital Photogrammetry Methods

Z. Kuzyk, A. Stavovyi, T. Ilkiv

The paper deals with the research and documentation of archaeological objects. The urgency and the possibility of photogrammetry for solving the tasks of urban archaeology are emphasized. Frontal plans and 3D-models were created with photogrammetric Workstation “Delta” and measurements of architectural details were performed.