

ДОСЛІДЖЕННЯ ЦИФРОВИХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЄФУ НЕРУХОМИХ ОБ’ЄКТІВ ІСТОРИКО-КУЛЬТУРНОЇ СПАДЩИНИ, СТВОРЕНИХ ЗА РІЗНІ РОКИ

Мета роботи – дослідити цифрові моделі рельєфу братської могили 1944 р., побудовані за різночасовими аеро- і картографічними матеріалами. Реалізація завдання передбачає побудову цифрових моделей рельєфу (ЦМР) GRID-методом на території єврейської братської могили в м. Винники та італійських військовополонених поблизу міста. На територію єврейської братської могили у м. Винники створено ЦМР за стереопарою архівних аерознімків, отриманих у 1944 р., та за матеріалами аерознімання з БПЛА, виконаного в 2015 р. Оскільки для архівних аерознімків не збереглися елементи орієнтування, їх геометрично трансформовано за допомогою програмного пакета ErdasImagine. Після цього стереопару опрацьовано в програмі Digitals й отримано елементи рельєфу на територію братської могили. Матеріали аерознімання 2015 р. з БПЛА на територію м. Винники опрацьовано в програмному пакеті Agisoft PhotoScan. Створено ортофотоплан та карту висот на територію міста. Елементи рельєфу на територію братської могили 1944 і 2015 рр. імпортовано в програмне середовище Surfer, де побудовано 3D цифрові моделі рельєфу. Оскільки на території могили немає значних перепадів висот, а рельєф доволі пологий, вибрано метод побудови ЦМР природної околиці, що дало позитивний результат. Аналізуючи цифрову модель рельєфу і карту векторів за 1944 р., можна чітко виділити межу братської могили, оскільки перепад висот між її краями та іншою територією 20–36 см залежно від ділянки межі. Аналіз цифрової моделі рельєфу і карти векторів за 2015 р. території братської могили, визначеної за аерознімком 1944 р., показав, що характерні перепади висот на колишній межі могили спостерігаються лише в лівому правому куті могили і на окремій ділянці правої межі. Показники перепаду висот від 15 до 20 см. Зазначимо, що перепади висот зафіксовано і на решті території, яка належить братській могилі та поза нею. Це можна пояснити багаторічним людським втручанням і сільськогосподарським розорюванням земель. Дослідження ЦМР братських могил італійських військовополонених біля м. Винники показало, що сучасна територія на 100 % заліснена, що унеможливує виконання аерознімання. Отже, для порівняння сучасної ЦМР зі створеною за стереопарою аерознімків 1944 р. у 2011 р. здійснено наземне тахеометричне знімання місцевості. Дані тахеометричного знімання експортовано в обмінний формат dxf, після чого відкрито в ПП Surfer і побудовано ЦМР. У цьому випадку цифрові моделі рельєфу побудовано із застосуванням методу Крайгінга, оскільки ділянка, на якій розташовані братські могили, доволі горбиста, із великим перепадом висот. За цифровими моделями рельєфу визначено 54 ями із похованнями, що збереглися до сьогодні. Наукова новизна роботи полягає у доопрацюванні методики поєднання різнорідних даних для побудови цифрових моделей рельєфу та створення цілісної картини дослідження території об’єкта історико-культурної спадщини. Отриманими даними можуть скористатись відповідні відділи зі збереження культурної спадщини Міністерства культури України для подальшого вивчення.

Ключові слова: цифрові моделі рельєфу; ортофотоплан; карта висот; братська могила; архівний аерознімок.

Вступ

Протягом останнього десятиліття один із найрозвиненіших напрямів використання цифрових технологій в історичних дослідженнях пов’язаний зі створенням віртуальних реконструкцій втрачених (повністю чи частково) об’єктів культурної спадщини. Мабуть, у центрі уваги – дослідницькі проекти, у яких різні технології тривимірного моделювання застосовують у задачах віртуальної реконструкції історичного міського простору – районів втраченої міської забудови

минулих століть, монастирських комплексів, будівель чи навіть цілих міст того чи іншого історичного періоду. Можна говорити і про зростання інтересу до розроблення віртуальних реконструкцій історичних міських ландшафтів. Цифрові технології та методи привели до радикальних змін у вивченні та збереженні культурної спадщини. Водночас цифрові підходи впливають на історичні дослідження, які є основою знань та розуміння культурної спадщини. Найочевидніший ефект – це своєрідне “публічне використан-

ня” історії. Результати цифрової історії доступніші для широкої аудиторії поціновувачів культурної спадщини – з урахуванням просторово-часового контексту. І якщо “просторовий поворот” характеризував недавні історичні дослідження, просторова локалізація історичних даних передувала цифровим підходам. Із 70-х років ХХ ст. концепції міського простору впливали на розвиток історичної урбаністики, а використання цифрових 3D-технологій дало помітний імпульс вивченню візуальної історії міста, віртуальної реконструкції втрачених його елементів Крім того, “архітектурна міська історія” також наголосила на ролі візуального чинника. Істотне місце в програмній статті відведено 3D-методам, що розглядаються як “наукова технологія”. З розвитком комп’ютерної графіки 60-х років і, очевидно, з 90-х років все більше уваги почали приділяти віртуальній реконструкції.

Сьогодні тривимірне ретрооцифрування наявних артефактів, отриманих за допомогою тривимірного лазерного сканування і фотограмметрії та цифрової тривимірної віртуальної реконструкції втрачених об’єктів, відтвореної на основі джерел, забезпечує адекватний доступ до об’єктів досліджень в археології, мистецтві, архітектурі та міській історії в епоху інтернету. Важливим елементом таких проєктів є контекстуалізація 3D-моделей на основі метаданих. Вважаємо, що що 3D-моделі мають великий потенціал із двох причин. По-перше, це точне відтворення геометричних та матеріальних властивостей реконструйованого об’єкта. По-друге – глибока інтерпретація джерел та гіпотетичне відтворення об’єкта допомагають історикам та користувачам глибше зрозуміти його.

Формалізація та структурування знань дають змогу оперативно використовувати дані та сприяють здобуттю знань у цифровому середовищі, а також створенню мереж знань на основі інтернет-технологій. Щодо історичної реконструкції на основі джерел, то проєкти, які роблять вебвізуалізацію зрозумілою, інтерпретованою, демонструють потенціал стійкої реєстрації процесів та зв’язку 3D-даних з подіями, джерелами та дійовими особами як пов’язані дані.

В Україні серед робіт, що стосуються дослідження цифрових моделей рельєфу та місцевос-

ті для вивчення об’єктів історико-культурної спадщини, необхідно відзначити роботи вчених Х. Бурштинської, І. Василюхи, С. Вовкодава, П. Ковалю, Б. Четверікова, З. Кузик та О. Тумської [Бурштинська та ін., 2007; Вовкодав, 2008; Кузик, 2013; Burshtynska & Tumska, 2000; Chetverikov and al., 2017; Chetverikov & Babiy, 2016].

Вивченням побудови ЦМР за регулярними і нерегулярними сітками займалися Ю. О. Карпінський та А. А. Лященко, їх результати опубліковано в наукових працях [Карпінський, Лященко, 2000].

Необхідно відзначити і закордонні наукові праці, що стосуються 3D-моделювання об’єктів історико-культурної спадщини. Загальну роль вивчення об’єктів історико-культурної спадщини на основі побудови 3D-моделей висвітлено в роботах [Agosto & Bornaz, 2017; Ubik and al., 2015; Liu and al., 2022]. Для створення 3D-моделей архітектурних споруд або визначних пам’ятників дуже широко застосовують методи короткобазисної фотограмметрії [Alsadik, 2014; Remondino & Menna, 2008]. У вивченні архітектурних об’єктів також дуже популярні фотограмметричні методи наземного знімання або радіального знімання споруд чи пам’ятників [Bolognesi and al., 2014; Hou & Cheng, 2021; Moisan and al., 2021; Solem & Nau, 2020, Mostafavi and al., 2019]. Загальні основи побудови 3D-моделей об’єктів історико-культурної спадщини із використанням фотограмметричного опрацювання знімків викладено в роботах [Vilceanu and al., 2014; Zhao and al., 2018]. Цікавим напрямом вивчення 3D-моделей об’єктів історико-культурної спадщини є методи, основані на бібліотеках комп’ютерного зору та машинного навчання [Barrile & Bilotta, 2018; Gelnar & Zegzulka, 2019]. Також у закордонній науковій літературі трапляються статті, що стосуються власне вивчення місць масових поховань часів Другої світової війни за аерознімками, але інструментарій методів опрацювання аерознімків у цих роботах дуже обмежений [Fiedler and al., 2009; Ossowski and al., 2018].

У м. Винники біля Львова до Другої світової війни, як і загалом на всій Галичині, була дуже розвинена єврейська громада. Тому цілком зрозуміло, що під час нацистської окупації біль-

шість євреїв вивезли до концтаборів, а решту розстріляли у місті й околицях та захоронили у братських могилах.

Під час Другої світової війни німці відгородили частину лісу між Лисиничами та дорогою Львів – Винники колючим дротом – заборонили туди наблизитися. Але дехто, ризикуючи життям, туди зазірав. Очевидці бачили, що сюди привозять на автомобілях євреїв, а також українців та поляків. Колону приречених вели на місце колишнього піщаного кар'єру, до задалегідь підготованих глибоких ям. Людям наказували роздягатися, а потім партіями підводили до ями під приціл встановленого кулемета. Розстрілювала їх спеціальна гестапівська команда. Щоб заглушити крики, вмикали на повну потужність декілька патефонів із танцювальною музикою одночасно.

На цьому місці відбувалась жорстока розправа із військовополоненими, яких привозили з концентраційного табору “Шталаг-328” (Цитадель).

Територія охоплює площу, що простягається вздовж вул. Січової, що з півдня та заходу обмежена житловими будівлями, з півночі – межею ліса, а зі сходу – ярмом.

Братські могили, влаштовані в лісі, з усіх боків обмежені лісовими насадженнями і розташовані на горбистій місцевості. Територію цих могил спеціально не виділено. Огорожа відсутня.

Мета

Мета роботи – дослідити цифрові моделі рельєфу братських могил 1944 р., побудовані GRID-методом за різночасовими аеро- і картографічними матеріалами. У роботі поставлено завдання дослідити дві різні ділянки території м. Винник і околиць, де розміщені братські могили. Територія могил також відрізняється: один об'єкт на відкритій місцевості, а другий – на залісненій. Зважаючи на це, необхідно підібрати дієві методи побудови ЦМР.

Методика та результати роботи

Перший об'єкт досліджень розташований у північній частині м. Винник поблизу Львова. Це єврейська братська могила, яка, за словами оче-

видців масових розстрілів, мала витягнуту форму, близьку до прямокутної.

Для ідентифікації братської могили як вхідні матеріали використано стереопару німецьких аерознімків 1944 р. із повздовжнім перекриттям 70 % (визначено аналітично), поперечного перекриття визначити не вдалось, оскільки наявна тільки ця стереопара. Висота аерофотознімання території 8000 м, масштаб знімання – 1:10500. Елементи орієнтування відсутні, оскільки знімки зберігаються у Національному архіві США у вигляді негативів, які відскановано. Знімки трансформовано у ПП Erdas Imagine та збережено у форматі GeoTIFF, що уможливило їх импорт та опрацювання у ПП Digitals. На рис. 1 подано фрагмент зони перекриття стереопари аерознімків із позначеною ділянкою, на якій, за свідченнями очевидців, була братська могила.



Рис. 1. Зона перекриття стереопари аерознімків 1944 р. із позначеною попередньо встановленою територією братської могили

Справді, якщо дешифрувати цю територію, проглядається збурена ділянка витягнутої форми, близька до прямокутної. Виявлене збурення за структурою відрізняється від збуреної землі внаслідок переорювання для сільськогосподарських потреб. Збурення не є однорідним на всій площі ділянки, що свідчить більше про структуру закопаної ями, ніж переореного верх-

нього шару ґрунту (рис. 2). За аерознімком визначено, що площа братської могили неправильної форми становить 939,6 м².

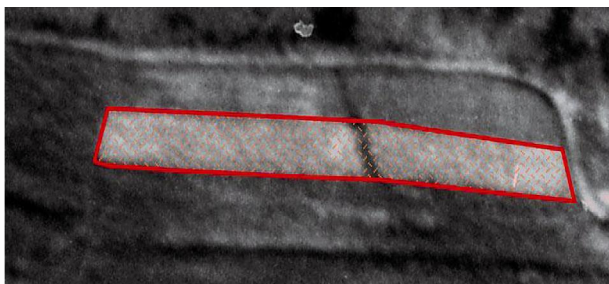


Рис. 2. Дешифрована за аерознімками 1944 р. територія братської могили у м. Винники

Для відображення дешифрованої з аерознімків 1944 р. території братської могили в межах сучасної містозабудови та її аналізу створено ортофотоплан та карту висот за даними аерознімання території м. Винники з БПЛА у 2015 р.

За допомогою програмного забезпечення Agisoft Photoscan за 119 знімками сформовано ортофотоплан та карту висот на територію м. Винник, що біля Львова. Під час створення ортофотоплану використано 37 контурних точок із відомими координатами, заздалегідь визначеними за допомогою ГНСС знімання.

Під час виконання операції вирівнювання знімків для побудови сцени вибрано середню точність. Параметр *Точність* у програмі Agisoft Photoscan передбачає поділ на: *дуже високу, високу, середню, низьку, дуже низьку*. Для підвищення точності доводиться збільшувати тривалість оброблення. Оскільки територія знімання доволі велика, а ділянка, яка нас цікавить, достатньо довга, нам достатньо середньої точності побудови моделі.

Після закінчення операції формуються:

- ✓ розріджена точкова модель місцевості, що складається зі спільних точок;
- ✓ розрахункові координати і параметри орієнтування знімків;
- ✓ уточнені (в першому наближенні) параметри калібрування камери.

Наступним етапом після вирівнювання фотографій є маркування опорних точок і задавання їх координат, а потім – оптимізація прив'язки. Завершальним етапом опрацювання ма-

теріалів аерознімання для створення ортофотоплану місцевості є побудова та експорт ортофотоплану. На рис. 3 подано приклад формування ортофотоплану м. Винники в програмі Agisoft Photoscan.

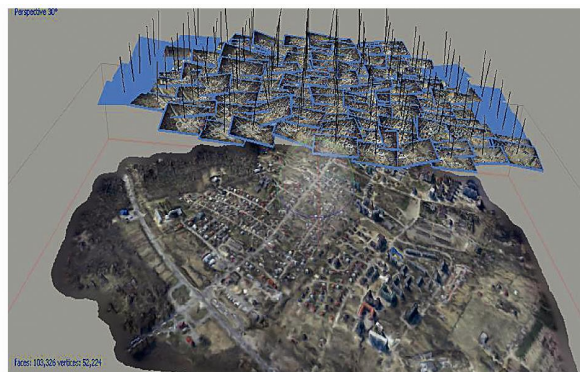


Рис. 3. Створення ортофотоплану та карти висот на територію м. Винники

На рис. 4 подано створений ортофотоплан м. Винники з віднайденою ділянкою, де, за даними 1944 р., розміщена братська могила. Територію, на яку потрапляє могила, винесено та оконтурено червоним кольором.



Рис. 4. Ортофотоплан м. Винники з виділеним фрагментом місцезонашування братської могили

Наступний етап – збереження фрагмента карти висот 2015 р. на цю територію і елементів рельєфу 1944 р. в окремі файли для подальшого їх імпортування у програмний пакет Surfer для моделювання. Фрагмент карти висот 2015 р. збережено у вигляді координат точок із висотними показниками у формат із розширенням *.txt, а елементи рельєфу 1944 р. вирішено зберегти в обмінний формат *.dxf як найзручніший для подальшого імпортування у Surfer.

Побудову ЦМР території братської могили за даними зі стереопари аерознімків 1944 р. та карти висот 2015 р. виконано у програмному пакеті Surfer. Оскільки під час побудови ЦМР нам потрібна найточніша інтерполяція і без зайвих аномальних викривлень поверхні, вибрано метод побудови “Природної околиці” (Natural Neighbor). Метод інтерполяції “Природної околиці” (Natural Neighbor) використовує середньозважене значення локальних даних, основане на концепції координат природного околу, обумовленого полігонами Тиссена. Метод дає змогу отримувати достовірні ізолінійні карти за наборами даних, що містить групу вибіркового точок в одних підобластях досліджуваної території та розріджені вибіркові точки в інших. Отримана в довільній точці оцінка завжди міститиметься у межах діапазону значень у найближчих точках. У побудованій моделі не буде “піків”, “ям”, “хребтів”, “долин”, не відображених вихідними

даними. Алгоритм, який використовує інструмент інтерполяції “Природна околиця”, знаходить найближчу до потрібної точки підмножину вхідних зразків і застосовує до них ваги, основані на пропорційних областях, щоб інтерполювати значення. У цьому методі оцінку змінної Z в деякій точці області дослідження визначають як середнє зважене значень цієї змінної у вибіркового точках (фактично в найближчих вибіркового точках):

$$Z_0 = \sum_{i=1}^n w_{i0} \cdot z_i, \quad (1)$$

де ваги w_{i0} визначають з використанням діаграм Вороного. Діаграми Вороного також називають полігонами Тиссена, або комірками Діріхле.

Результати побудови ЦМР та карт векторів території братської могили за 1944 і 2015 рр. подано на рис. 5–8.

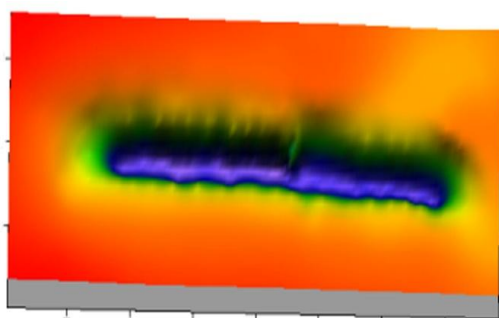


Рис. 5. ЦМР території братської могили, створена за стереопарою аерознімків 1944 р.

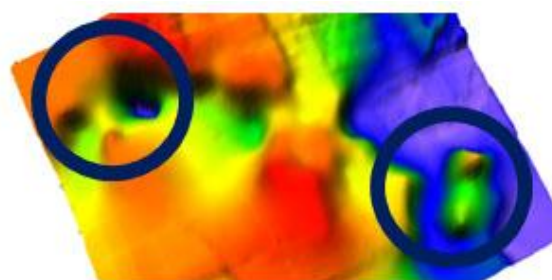


Рис. 6. ЦМР території братської могили, створена за картою висот аерознімання 2015 р.

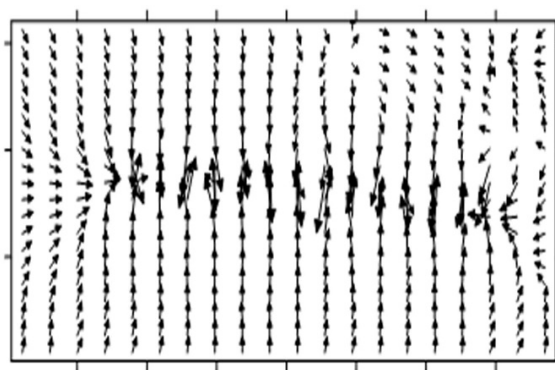


Рис. 7. Карта векторів братської могили, створена за стереопарою аерознімків 1944 р.

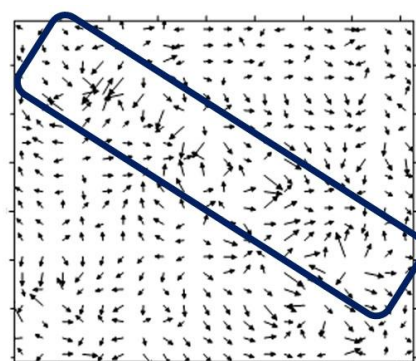


Рис. 8. Карта векторів братської могили, створена за картою висот аерознімання 2015 р.

Аналізуючи цифрову модель рельєфу і карту векторів за 1944 р., чітко бачимо межу братської могили, оскільки перепад висот між її краями та іншою територією становить 20–36 см залежно від ділянки межі.

Аналіз цифрової моделі рельєфу і карти векторів за 2015 р. території братської могили, визначеної за аерознімком 1944 р., показав, що характерні перепади висот на колишній межі могили спостерігаються лише в лівому правому куті могили і на окремі ділянці правої межі. Показники перепаду висот від 15 до 20 см. Зазначимо, що перепади висот спостерігаються і на решті території, яка належить братській могилі та поза нею. Це можна пояснити багаторічним людським втручанням і сільськогосподарським розорюванням земель.

Другий об'єкт досліджень розташований у лісі біля траси Львів – Винники, а точніше, між трасою і селищем Лисиничі. Це скупчення братських могил євреїв та італійських військовополонених, яких привозили на страту із концтабору “Шталаг-328” (Цитадель) під час Другої світової війни.

Оскільки територія досліджень заліснена, то виконувати аерознімання з БПЛА, як в першому варіанті, недоцільно. Отож, основні вихідні матеріали для досліджень – стереопара німецьких аерознімків 1944 р., як і в першому випадку, та топографічний план території досліджень масштабу 1:1000, створений у 2011 р.

Стереопару архівних німецьких аерознімків отримано із Національного архіву США у вигляді відсканованих негативів. Аерознімки створено 29.07.1944 р. Аерознімання виконано з висоти 8170 м, масштаб знімання 1:11000. Аналітично визначено, що зона повздовжнього перекриття становить 70 %, як і в першому випадку. Знімки трансформовано за 11 опорними точками в ПП ErdasImagine та імпортовано в середовище Digitalis для подальшого опрацювання.

На рис. 9 подано зону перекриття стереопари німецьких аерознімків 1944 р. на територію досліджень. Зі знімка видно, що територія теперішнього лісу в 1944 р. заліснена не була, фактично заліснення тільки починалось. Між лісом і дорогою Львів – Винники був піщаний кар'єр. Уздовж доріжок у теперішній зоні лісу інтерпретуються братські могили різної форми і розміру.



Рис. 9. Зона перекриття стереопари аерознімків 1944 р. на територію братських могил італійських військовополонених поблизу с. Лисиничі

Для порівняння ЦМР 1944 р. із сучасною моделлю використано топографічний план, створений у 2011 р. на основі тахеометричного знімання у масштабі 1:1000. Переріз рельєфу через 1 м. Згодом цей план було завантажено у програмний пакет Surfer та оцифровано горизонталі для побудови ЦМР.

Побудовано ЦМР за сучасним топографічним планом і стереопарою архівних аерознімків 1944 р. за допомогою горизонталей у програмному пакеті Surfer. Оскільки рельєф дослідної ділянки доволі крутий, вибрано метод Кригінга як оптимальний для побудови такого виду рельєфу.

Кригінг – це покращений геостатистичний метод, який дає змогу будувати передбачувану поверхню із набору точок з z -значеннями. На відміну від інших методів інтерполяції, інструмент Kriging передбачає інтерактивне дослідження просторової поведінки явища, представленого z -значеннями, до вибору оптимального методу оцінювання для побудови результуючої поверхні.

Основна формула інтерполяції методом Кригінга формується як зважена сума даних:

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(s_i), \quad (2)$$

де $Z(s_i)$ – значення, що вимірюється в положенні i ; λ_i – невідома вага для вимірюваного значення у положенні i ; s_0 – розташування прогнозу; N – кількість вимірюваних значень.

Тут вага (λ_i) залежить тільки від відстані до розміщення прогнозу. Однак у методі Кригінга

ваги застосовують не тільки на відстані між точками, що вимірюють, і місцезнаходженнями прогнозів, але також на загальному просторовому розташуванні вимірюваних точок. Щоб використовувати просторове розташування у вагах, потрібно визначити кількість просторової автокореляції. Отже, у звичайному Крігінгу вага (λ_i)

залежить від встановленої моделі для вимірюваних точок, від відстані до розташування прогнозу і від просторових відношень між значеннями, які вимірюють навколо розташування прогнозу.

На рис. 10–13 подано побудовані ЦМР і карти векторів братських могил у Лисиницькому лісі на 1944 і 2011 рр.

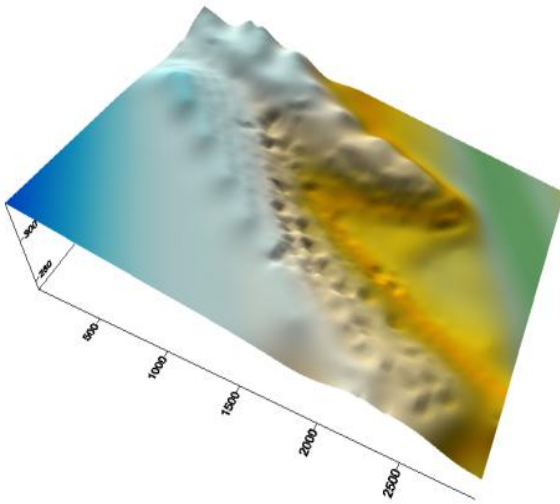


Рис. 10. ЦМР території братських могил, створена за стереопарою аерознімків 1944 р.

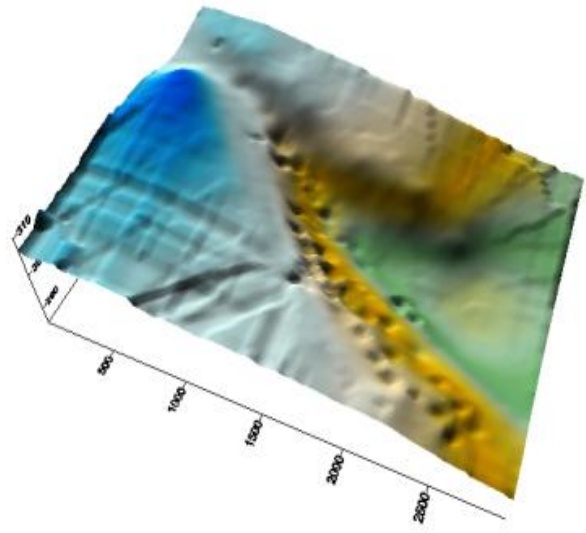


Рис. 11. ЦМР території братських могил, створена за топографічним планом 2011 р.

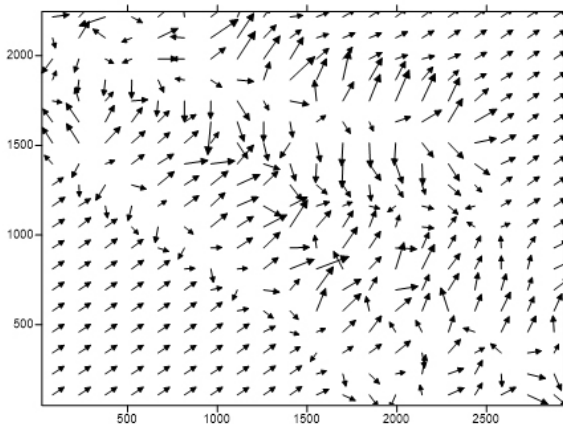


Рис. 12. Карта векторів братських могил, створена за стереопарою аерознімків 1944 р.

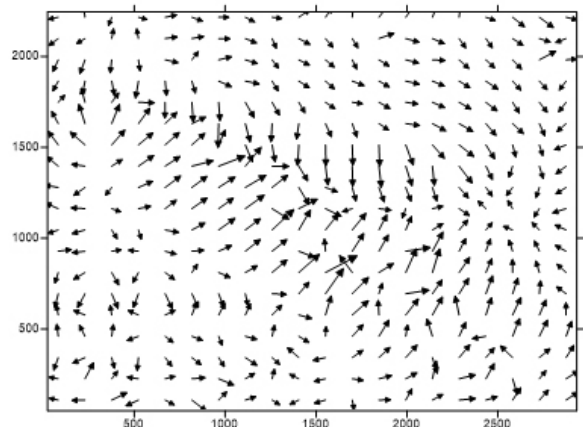


Рис. 13. Карта векторів братських могил, створена за топографічним планом 2011 р.

Результати визначення братських могил у Лисиницькому лісі за німецькими аерознімками 1944 р. нанесено на сучасний топографічний план території 2011 р. Відповідно до аерознімків, виявлено 54 ями з похованнями, розподілені переважно вздовж просікової доріжки. До сьогодні збереглось 46 ям, які повторюють місце-

положення могил 1944 р. Глибина ям у 1944 р., за побудованими ЦМР, коливалась від 30 до 60 см залежно від площі, на 2011 р. глибина коливається від 50 до 110 см. Це можна пояснити просіданням землі внаслідок розкладання біологічних речовин та нашаруванням землі навколо могил. Решта вісім ям, які не збереглися, швид-

ше за все, були засипані внаслідок можливої зміни рельєфу тієї ділянки, на якій вони містились, з часом, можливо, внаслідок людського втручання.

На рис. 14 подано фрагмент топографічного плану території досліджень 2011 р. із нанесеними (червоним кольором) ямами братських поховань станом на 1944 р.

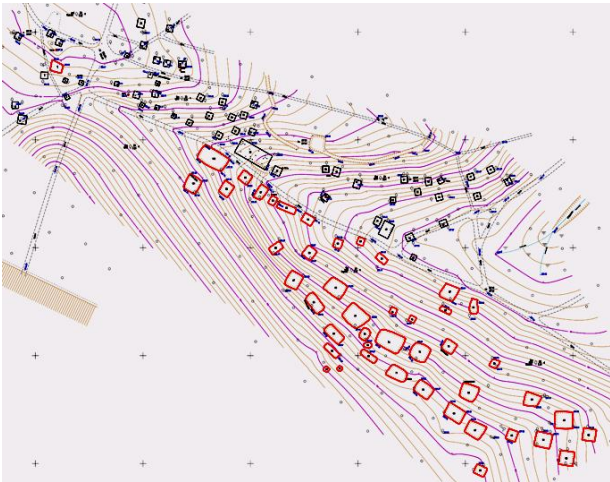


Рис. 14. Фрагмент топографічного плану масштабу 1:1000, створений у 2011 р., з нанесеними ямами братських могил, перенесених з ЦМР 1944 р. (зменшене зображення)

Наукова новизна і практична значущість

Наукова новизна роботи полягає у доопрацюванні методики поєднання різнорідних даних для побудови цифрових моделей рельєфу та створенні цілісної картини дослідження території об'єкта історико-культурної спадщини. Отримані дані можуть використовувати відповідні відділи зі збереження культурної спадщини Міністерства культури України для їх подальшого вивчення.

Висновки

Щоб досягти поставленої мети, аналізуючи цифрову модель рельєфу, побудовану GRID-методом, і карту векторів за 1944 р., ми визначили межу братської могили. Перепад висот між краями могили й іншою територією 20–36 см залежно від ділянки межі. Аналіз цифрової моделі рельєфу і карти векторів за 2015 р. території братської могили показав, що характерні

перепади висот на колишній межі могили спостерігаються лише в лівому правому куті й на окремій ділянці правої межі. Показники перепаду висот від 15 до 20 см. Зазначимо, що перепади висот спостерігаються і на решті території, яка належить братській могилі та поза нею. Це можна пояснити багаторічним людським втручанням і сільськогосподарським розорюванням земель. Площа могили, згідно із аерознімками 1944 р., становить 939,6 м².

За цифровими моделями рельєфу братських могил італійських військовополонених у лісі поблизу с. Лисиничі, побудованих GRID-методом за стереопарою архівних аерознімків 1944 р. та за матеріалами тахеометричного знімання 2011 р., визначено 54 ями з похованнями, що збереглися до сьогодні.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Бурштинська Х., Василюха І., Коваль П. Технологія побудови цифрової моделі рельєфу для створення плану дна ріки. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2007. Вип. 69. С. 135–143. <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/may/1763/gka69200721.pdf>
- Вовкодав С. Цифрове моделювання місцевості в археологічних дослідженнях. *Наукові записки з української історії*. Переяслав-Хмельницький, 2008. Вип. 21. С. 21–30.
- Карпінський Ю. О., Лященко А. А. Орографічна-триангуляційна цифрова модель рельєфу. *Вісник геодезії та картографії*. 2000. № 3(18). С. 28–32.
- Кузик З. Застосування цифрових моделей місцевості для документації об'єктів культурної спадщини. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2013. Вип. 78. С. 96–100. <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/may/1508/gka78201316.pdf>
- Agosto, E., & Bornaz, L. (2017). 3D Models in Cultural Heritage: Approaches for Their Creation and Use. *International Journal of Computational Methods in Heritage Science (IJCMHS)*, 1(1), 1–9. <http://doi.org/10.4018/IJCMHS.2017010101>
- Alsadik, B. S. (2014). Guided close range photogrammetry for 3D modelling of cultural heritage sites. University of Twente, Faculty of Geo-Information Science and *Earth Observation (ITC)*. <https://doi.org/10.3990/1.9789036537933>

- Barrile Vincenzo, & Bilotta Giuliana (2018). Computer Vision in 3D Modeling of Cultural Heritage: The Riace Bronzes. *Advanced Science Letters*, 24(1), 581–586. <https://doi.org/10.1166/asl.2018.11764>
- Bolognesi M., Furini A., Russo V., Pellegrinelli A., & Russo P. (2014). Accuracy of cultural heritage 3D models by RPAS and terrestrial photogrammetry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(5), 113. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-113-2014>
- Burshtynska Kh., & Tumska O. (2000) Computer technology of determination of area of Digital Elevation Model. *19th ISPRS Congress*, Vol. XXXIII Work, Gr. IV, Amsterdam, 2000.
- Chetverikov B., Bondar K., Homenko R., Didenko S., & Sheykhet M. (2017). Determination of the location of historical objects using photogrammetric methods and methods of non-destructive ground research. *Geodesy, Cartography, and Aerial Photography*, 85, 94–103. <https://doi.org/10.23939/istcgcap2017.01.094>
- Chetverikov B., & Babiy L. (2016). Determination of boundaries of ancient burial places using the archived aerial and cartographic materials. *Modern achievements of geodesic science and industry*, Vol. I (31), 111–114. <http://zgt.com.ua/%d0%b2%d0%b8%d0%bf%d1%83%d1%81%d0%ba-%d1%96-31-2016/>
- Fiedler, S., Berger, J., Stahr, K., Graw, M. (2009). Localization of a Mass Grave from the Nazi Era: A Case Study. *Criminal and Environmental Soil Forensics*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9204-6_19
- Gelnar, D., Zegzulka, J. (2019). Input Parameters for DEM – Geometry of the 3D Model and Validation Machine. *Discrete Element Method in the Design of Transport Systems*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05713-8_7
- Hou, Jh., & Cheng, Cl. (2021). Reconstructing Photogrammetric 3D Model by Using Deep Learning. *Formal Methods in Architecture*. Advances in Science, Technology & Innovation. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57509-0_27
- Liu, X.-Y., Li, A.-B., Chen, H., Men, Y.-Q., Huang, Y.-L. (2022). 3D Modeling Method for Dome Structure Using Digital Geological Map and DEM. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 11, 339. <https://doi.org/10.3390/ijgi11060339>
- Moisan Emmanuel, Heinkelé Christophe, Foucher Philippe, Charbonnier Pierre, Grussenmeyer Pierre, Guillemain Samuel, Koehl Mathieu (2021). Combining photogrammetric and bathymetric data to build a 3D model of a canal tunnel. *The photogrammetric Record*, 36(175), 202–223. <https://doi.org/10.1111/phor.12379>
- Mostafavi, A., Scaioni, M. and Yordanov, V. (2019). Photogrammetric solutions for 3D modeling of cultural heritage sites in remote areas. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-4/W18, 765–772. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W18-765-2019>
- Ossowski A., Bykowska-Witowska M., & Brzeziński P. (2018). Application of analysis of aerial photographs in search of burial sites of victims of war and totalitarian crimes. *Issues of forensic science*, 299 (1), 77–90. <https://doi.org/10.34836/pk.2018.299.5>
- Remondino F., & Menna F. (2008). Image-based surface measurement for close-range heritage documentation. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 37(B5-1), 199–206.
- Solem, D. & Nau, E. (2020). Two New Ways of Documenting Miniature Incisions Using a Combination of Image-Based Modeling and Reflectance Transformation Imaging. *Remote Sens.*, 12, 1626. <https://doi.org/10.3390/rs12101626>
- Vilceanu C. B., Herban S., & Grecea C. (2014). Creating 3D Models of Heritage Objects using Photogrammetric Image Processing. *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1558, 1599–1602, <https://doi.org/10.1063/1.4825832>
- Ubik S., Navrátil J., Trávníček Z. and Melnikov J. (2015). Remote access to 3D models of cultural heritage. *Digital Heritage*, 757–760, <https://doi.org/10.1109/DigitalHeritage.2015.7419622>
- Zhao, S., Hou, M., Hu, Y., and Zhao, Q. (2018) Application of 3d model of cultural relics in virtual restoration, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-3, 2401–2405. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-2401-2018>

Borys CHETVERIKOV¹, Lyubov BABIY², Zoriana KUZYK³, Iryna ZAYATS⁴, Mykhailo PROTSYK⁵

Department of Photogrammetry and Geoinformatics, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine, tel.+38(063)1671585, e-mail: chetverikov@email.ua, ¹<https://orcid.org/0000-0001-8677-1735>,

²<https://orcid.org/0000-0002-5772-4865>

STUDY OF DIGITAL ELEVATION MODELS OF AN IMMOVABLE OBJECTS OF HISTORICAL AND CULTURAL HERITAGE, CREATED OVER DIFFERENT YEARS

The purpose of the work is to investigate the digital elevation models of the mass grave of 1944, built on the basis of aerial and cartographic materials of different times. The implementation of the task involves the construction of digital elevation models (DEM) on the territory of the Jewish mass grave in the city of Vynnyki and Italian prisoners of war near the city. On the territory of the Jewish mass grave in the city of Vinnyky, a DEM was created based on a stereo pair of archival aerial images obtained in 1944 and on the basis of aerial photography from a UAV, which was carried out in 2015. Since archival aerial photographs images did not contain orientation elements, they were geometrically transformed using the ErdasImagine software. After that, the stereo pair was processed in the Digitals program, where relief elements were obtained on the territory of the mass grave. Materials of aerial photography from a UAV on the territory of the city of Vynnyki, which was carried out in 2015, processed in the Agisoft PhotoScan software, where an orthophoto plan and a elevation map of the city territory were created. Elements of relief on the territory of the mass grave of 1944 and 2015 were imported into the Surfer software environment, where 3D digital elevation models were built. Since the territory of the grave did not have significant differences in height, and the relief was quite gentle, the method of constructing the DEM of the Natural Neighbor was chosen, which gave a positive result. Analyzing the digital elevation model and the vector map for 1944, the border of the mass grave is clearly distinguished, since the height difference between its edges and the rest of the territory is from 20 to 36 cm, depending on the section of the border. The analysis of the digital elevation models and the vector map for 2015 of the territory of the mass grave determined from the aerial image of 1944 showed that the characteristic height differences on the former border of the grave are observed only in the left-right corner of the grave and on a separate section of the right border. Height difference indicators range from 15 to 20 cm. It should be noted that height differences are also observed in the rest of the territory belonging to the mass grave and outside it. This can be explained by many years of human intervention and agricultural plowing of the land. With regard to the investigation of the mass graves of Italian prisoners of war near the city of Vinniki, the modern territory is 100 % wooded, which makes it impossible to carry out aerial photography. Therefore, in order to compare the modern DEM with the stereo pair of aerial images of 1944, it was decided to conduct a ground tacheometric survey of the area in 2011. Tacheometric survey data was exported to the dxf exchange format, after which it was opened in Surfer and the DEM was built. In this case, digital elevation models were built using the Kriging method, since the area where the mass graves are located is quite hilly with a significant difference in elevation. According to the digital elevation models, 54 pits with burials that have survived to this day have been identified. The scientific novelty of the work consists in the development of the concept of combining disparate data for the construction of digital elevation models and the creation of a complete picture of the study of the territory of the object of historical and cultural heritage. The received data can be used by the relevant cultural heritage preservation departments of the Ministry of Culture of Ukraine for their further study.

Key words: digital elevation models; orthophoto plan; elevation map; mass grave; archival aerial image.

Надійшла 02.09.2022 р.