

Pomiary i model numeryczny starożytnego miasta Ptolemais w Libii

GEODEZJA



I ARCHEOLOGIA

Nowoczesne techniki geodezyjne są stosowane na stanowisku w Ptolemais od samego początku badań zainicjowanych w 2001 roku przez ś.p. prof. dr. hab. Tomasza Mikockiego, który zawsze wspierał interdyscyplinarne rozwiązania w archeologii.

WIESŁAW MAŁKOWSKI

• STAROŻYTNE MIASTO PTOLEMAIS

Ptolemais (Tolmeita), miejsce polskich badań archeologicznych prowadzonych przez Instytut Archeologii Uniwersytetu Warszawskiego, jest stanowiskiem unikatowym zarówno pod względem stanu zachowania antycznej architektury, jak i dyskusji dotyczącej historii północnej Afryki. Od VI w. p.n.e. istniał tu port obsługujący starożytną Barkę (El Merj), miasto oddalone od wybrzeża o ok. 30 km, założone przez greckich kolonistów i opisywane przez Herodota. Lokalizacja w środkowej części wybrzeża Cyrenajki umożliwiała komunikację z najważniejszymi centrami świata antycznego: Rzymem (za pośrednictwem Tunezji, Malty i Sycylii), Atenami z przystankiem na Krecie oraz Aleksandrią na Wschodzie i Trypolitanią na Zachodzie. Okręty handlowe i wojenne przez stulecia pływały do Ptolemais i chociaż portowa część miasta z archeologicznego punktu widzenia jest słabo rozpoznana, to do dziś funkcjonuje tu mały port rybacki, który malowniczo urozmaica skaliste wybrzeże.

• METODY BADAŃ

Archeologia jest nauką, która daje najlepsze rezultaty przy wykorzystaniu metod interdyscyplinarnych. W Ptolemais, obok tradycyjnych wykopaliisk, prowadzone są badania o charakterze nieinwazyjnym. Dzięki sprawdzonym technikom, doświadczeniu i wiedzy tworzona jest nowa metodyka dokumentacji zabytków. Ca-



Mapa wybrzeża Morza Śródziemnego z zaznaczonymi głównymi ośrodkami w starożytności

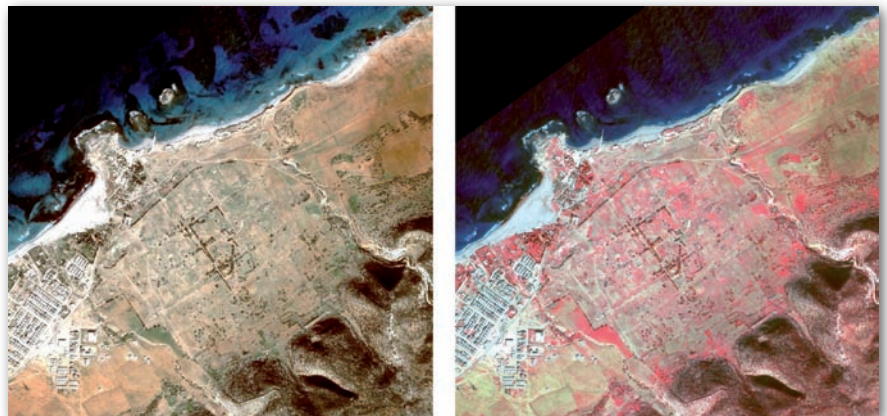
łość procesu można w skrócie nazwać odwrotnym projektowaniem. Mając relikty, często bardzo szczątkowe, odnoszące się do przeszłości, buduje się hipotetyczny plan budowli – projekt, charakterystyczny dla danego okresu dziejów.

Przed podjęciem tradycyjnych badań archeologicznych bardzo ważne jest rozpoznanie terenu z zastosowaniem metod

nieinwazyjnych. Pozwalają one na dokumentację oryginalnego, niepowtarzalnego kontekstu i krajobrazu, który często zmienia się wskutek wykopalisk. Metody i techniki geodezji i geofizyki odpowiednio zastosowane są niezwykle cenne i uzupełniają tradycyjne metody archeologiczne. Na przykładzie Ptolemais można zaprezentować wyniki procesu pozyskiwania danych

w terenie, ich komputerowego przetwarzania jako zespołu informacji, a w rezultacie gromadzenia wiedzy i doświadczeń, budowania hipotez naukowych i ich weryfikacji.

Opracowanie numerycznego modelu miasta bazuje na analizie obrazów satelitarnych, m.in. kompozycji kolorów RGB (czerwony, zielony, niebieski) z dodatko-



Obrazy satelitarne rejonu Ptolemais



Mapa numeryczna Ptolemais z rekonstruowaną siatką zabudowy

wym kanałem alfa rejestrującym widmo podczerwieni. Odpowiednie dopasowanie progów kontrastu, jasności oraz krzywych tonalnych pozwala na przedstawienie kształtu zabudowy i wydzielenie obszarów do przeprowadzenia dodatkowej prospekcji. Analiza fotografii satelitarnych, zwłaszcza tych w wysokiej rozdzielczości (50 cm/piksel), to doskonałe narzędzie uzupełniające mapy geofizyczne i wektorowe.

Zaletą zdjęć lotniczych jest to, że powierzchnia obszaru pokazana jest na jednej scenie, dzięki której można wydzielić różnice kolorystyczne kilku miejsc, zakładając podobny poziom oświetlenia. Dodatkowo kanał odwzorowujący promieniowanie podczerwone dostarcza informacji o ciepłe emitowanym przez konkretne punkty na obrazie, co pozwala wstępnie określić stopień wilgotności gleby i rodzaj roślinności, na które to czynniki w przypadku Ptolemais wpływ mają zasypane budowle.

● MAPA WEKTOROWA

Wektorowa mapa numeryczna powstała na podstawie pomiarów sytuacyjno-wysokościowych wykonywanych z użyciem tachimetrów elektronicznych oraz odbiorników GPS. Mapa ta jest elementem spajającym dane geoprzestrzenne. Umożliwia ona prawidłową lokalizację obiektów połączonych z bazą danych oraz obrazów rastrowych powiązanych za pomocą georeferencji. Podczas pomiaru sytuacyjno-wysokościowego realizowanego metodą biegunową oraz pomiarów GPS RTK mierzona jest obwódka kamieni na poziomie styku z gruntem oraz ich wysokość nad powierzchnią ziemi. Pomiar biegunowy szczegółów oparty na osnowie (X, Y, H) przetwarzany jest w programie WinKalk, a gotowe bloki DXF zawierające informacje o punktach (X, Y, H) są eksportowane do programu AutoCAD Map3D w celu wykreślenia mapy.

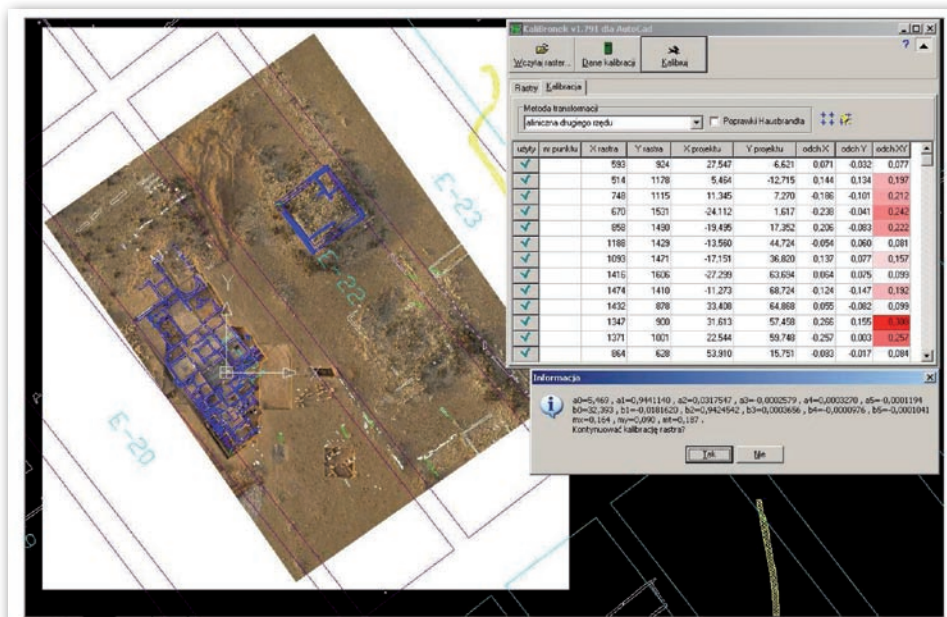
Dokumentacja tachimetryczna lub pomiary GPS RTK obiektów archeologicznych dają możliwość wizualizacji i częściowej rekonstrukcji krajobrazu przez budowanie powierzchni opartych na siatkach trójkątów nieregularnych (TIN), następnie interpolowanych do zdefiniowanych skalą numerycznych modeli terenu (NMT). Opracowania w tej formie połączone z poprawnie zlokalizowanymi obrazami satelitarnymi i fotografiami lotniczymi wykorzystywane są następnie jako podstawa do analiz przestrzennych, wyszukiwania elementów modelu spełniających konkretne cechy (np. spadki terenu i zlewnie), świadczące o zalegających poniżej obiektach archeologicznych.

● WYKORZYSTANIE ZDJĘĆ I MAP

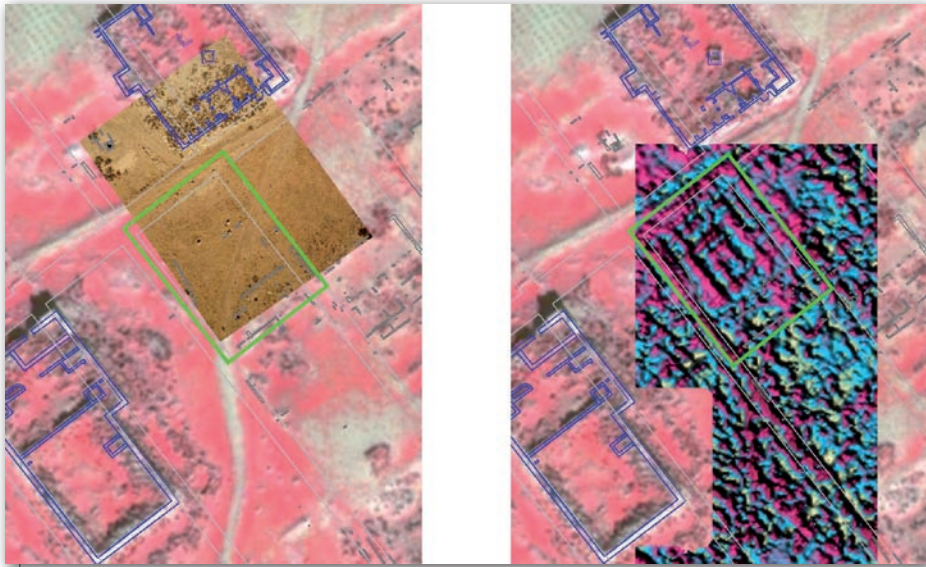
Użycie obrazów i fotografii jako map okazało się niezwykle cenne przy badaniach archeologicznych, zarówno na etapie poszukiwania zaspanych struktur,

jak i przy inwentaryzacji widocznych na powierzchni lub odkopywanych budowli. Warunki naturalne występujące w Cyrenajce tworzą swoisty mikroklimat – zarówno dzięki bliskości wybrzeża morskiego, jak i naturalnej granicy Wzgórz Zielonych (arab. Gebel Akhdar). W związku ze zróżnicowanym krajobrazem: granicą z pustynią, pasem wspomnianych wzgórz oraz płaskowyżem wzdłuż wybrzeża, ułożenie miast antycznych zyskuje dzisiaj niewątpliwie na atrakcyjności. Czynnikiem lokalizacji odgrywał też ważną rolę przy zakładaniu tych ośrodków. Wpływ na ich powstanie miały na pewno – tak ważne dla rozwoju rolnictwa – nieprawdopodobnie żyzne gleby oraz wartość średnich rocznych opadów, które wielokrotnie przekraczają wskaźniki notowane na pustyni oddalonej zaledwie o 150-200 km na południe. Wspomniana wilgotność terenu często ułatwia lokalizację obiektów archeologicznych i interpretację fotografii lotniczych i obrazów satelitarnych. Obszary zakrywające pozostałości zabudowy odznaczają się innym pasmem kolorystycznym niż pola uprawne lub przestrzenie niezagospodarowane. Dzięki wyodrębnieniu odpowiednich fototonów ze zdjęć można odszyfrować zasięg, a nawet kształt konkretnych obiektów: ulic, placów, granic działek z zabudową publiczną i prywatną.

Korelacja fotografii z planem wektorowym oraz pomierzoną siatką fotopunktów jest składnikiem procesu przetwarzania danych. Raster (mapa bitowa), zyskując metryczne cechy planu, po-



Proces przetwarzania fotografii lotniczej w kartometryczny fotoplan. Połączenie dwóch metod inwentaryzacji: pomiaru sytuacyjno-wysokościowego uczytelniającej fotografię lotniczą.



Zestawienie danych: pomiaru sytuacyjno-wysokościowego, obrazów satelitarnych, fotografii lotniczych, map geofizycznych użytych przy poszukiwaniu świątyni rzymskiej

zwala na pomiar i obliczanie parametrów fotografowanych struktur, a nawet na późniejsze wytyczanie rekonstruowanej budowli w terenie. Wszystko to wpływa bardzo pozytywnie na proces budowania hipotez związanych z planem zagospodarowania starożytnego, nieistniejącego dziś miasta. W celu weryfikacji oraz finalnej wizualizacji łączy się pomiary z dodatkowo przeprowadzonymi badaniami (analizą materiału powierzchniowego, mapami geofizycznymi czy wreszcie planami warstwicowymi lub zbudowanymi na podstawie punktów pomiarowych cyfrowymi modelami terenu NMT).

● POMIARY GEOFIZYCZNE

Drugą, znacznie bardziej szczegółową od mapy wektorowej, jest powstająca w efekcie badań geofizycznych rastrowa mapa przysypanych obiektów. Bardzo użytecznym narzędziem do studiowania antycznej urbanistyki jest prawidłowa lokalizacja rejestrowanych wartości pola magnetycznego (nT/m) oraz pozornej oporności gruntu (ohm-m). Lokalizacja następuje dwuetapowo: jako pomiar profili w obrębie wytyczonych kwadratów oraz wspólna rejestracja danych z magnetometru i GPS RTK. Możliwe jest też zestawienie kolumn czasowych danych z magnetometru i GPS do łącznego opracowywania. Sprzężone pomiary geofizyczne i geodezyjne wykazują dużą skuteczność przy wykrywaniu większości obiektów archeologicznych i dają znakomite rezultaty przy poszukiwaniu struktur liniowych, takich jak: granice ulic, sieć wodociągowo-kanalizacyjna czy ciągi kolumnad. Efektem tych działań w Ptolemais jest szczegółowa mapa dla ponad 30 hektarów miasta i wykrycie dziesiątek nowych, nieznanych budowli, w tym świątyni, forum, łaźni, sieci wodociągowo-kanalizacyjnej.

● SPRZĘT GEODEZYJNY

W Ptolemais pomiary geodezyjne realizowane są z wykorzystaniem punktów osnowy, zastabilizowanej przez polską firmę geodezyjną Geokart-International działającą w Afryce Północnej już od około 30 lat. Osnowa pomiarowa służy pracom tachimetrycznym wykonywanym z użyciem sprzętu zakupionego z subwencji Fundacji na rzecz Nauki Polskiej. Początkowo Misja Polska została wyposażona w dwa tachimetry elektroniczne Leica TC1105 oraz TCR407power, którymi inwentaryzowane były widoczne na powierzchni fragmenty budowli antycznych. Instrument z serii TCR wielokrotnie przydał się przy dokumentacji elewacji, wysokich kolumn oraz podziemnych cystern, co byłoby w innym przypadku bardzo trudne, z uwagi na ich konstrukcję oraz praktycznie zerowy poziom oświetlenia w środku. Tachimetr transportowany był przez ciasny pionowy szyb do środka obiektu archeologicznego. Następnie wykonywany był pomiar punktów z wnętrza obiektu w celu wyznaczenia kształtu i ob-

jętości pomieszczenia (liczącego od 6 do ponad 50 m sześciennych). Zasięg wewnątrz (cystern niegdyś wypełnianych wodą) był obliczany i łączony z planem budowli widocznej na powierzchni.

● SYSTEM INFORMACJI O TERENIE DLA PTOLEMAIS

Od tego roku dzięki dofinansowaniu z programu Novum w ramach subwencji Fundacji na rzecz Nauki Polskiej następuje proces modernizacji sprzętowej Pracowni Badań Archeologicznych Ptolemais Instytutu Archeologii UW. Efektem tego projektu jest zakup systemu GPS RTK, profesjonalnego systemu fotogrametrycznego, magnetometru cezowego oraz serwera danych. Jest to sprzęt niezbędny do zbudowania systemu informacji o terenie dla starożytnego Ptolemais. Dzięki temu systemowi będzie można wydajnie interpretować archeologicznie i architektonicznie całe miasto obejmujące ponad 200 hektarów. Danych do opracowań dostarczają w dużej mierze analizy skalibrowanych zdjęć fotogrametrycznych wykonywanych z użyciem specjalnej konstrukcji opartej na latawcu.

Przeprowadzanie pomiarów bezpośrednio w terenie oraz pośrednio – poprzez łączenie zdjęć na poziomie dokumentacji – daje szerszą perspektywę obserwacji podziałów architektury na większych obszarach. Takie łączone operacje pomagają w poszukiwaniu pierwotnych i wtórnych podziałów zarówno w obrębie dzielnicy miasta, jak i pojedynczych budynków. Jest to o tyle ważne, że Ptolemais ma regularny kształt siatki miejskiej z ulicami przecinającymi się pod kątem prostym. W obrębie zaplano-



Interpretacja archeologiczno-architektoniczna faz zabudowy Pałacu Kolumnowego w Ptolemais.

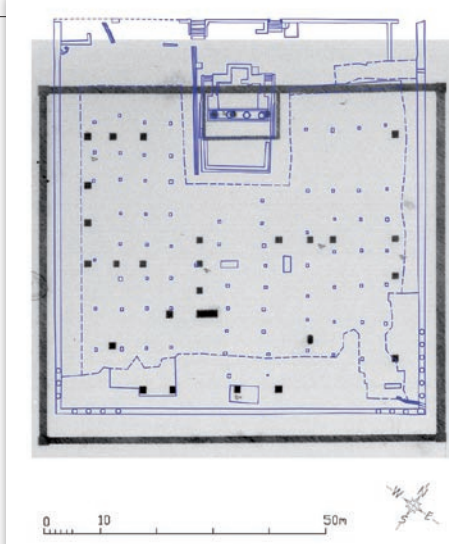
wanych przestrzeni działek, zwanych insulami, budowano domy mieszkalne oraz budowle publiczne, które często zajmowały przestrzeń kilku podstawowych modułów (forum, termy, świątynie). Przy interpretacji pomiarów szczegółowych ważne jest wzięcie pod uwagę historii miasta, ponieważ rejestrowane elementy architektury często pochodzą z różnych okresów historycznych i pokazywane powinny być jako oddzielne plany.

W efekcie stosowania georeferencji do przetwarzanych obrazów rastrowych powstaje wielowarstwowy numeryczny model miasta antycznego, w którym informacje mogą być wyświetlane selektywnie według potrzeb interpretacji i hipotez. Podstawą w modelu jest historycznie interpretowany wektorowy plan miasta z rekonstrukcją siatki insul wykonany w oprogramowaniu AutoCAD. Do planu dołączany jest następnie zestaw potrzebnych aktualnie informacji w postaci grafiki rastrowej (GeoTIFF), modeli trójwymiarowych (rekonstrukcje 3D, siatki TIN, modele NMT), baz danych ze zdefiniowanymi ścieżkami dostępu do serwera. Plan miasta bazuje na metodach nieinwazyjnych, unikając wielkich powierzchni wykopalisk, jednak zakładając sondáže – wykopy kalibrujące chronologię rejestrowanych na powierzchni obiektów.

Dopasowywanie obrazów rastrowych ma jeszcze jeden aspekt, a mianowicie pozwala na porównywanie archiwalnych map i planów w jednej skali z obecnie uzyskiwanymi danymi. Wyszukiwanie, kwerenda i przetwarzanie materiałów archiwalnych (starych map i planów) polega na dostrajaniu ich w skali oraz porównywaniu z nowymi pomiarami. Po skalibrowaniu takiego rastra (mapy archiwalnej) następuje jego wektoryzacja i weryfikacja. Korzyści płynące z tego typu działań polegają na obserwacji nieistniejących już dzisiaj elementów, np. kolumnad, które zniknęły z krajobrazu w ciągu ostatnich dwóch stuleci. Również pomiary odległości obserwowane na starych dokumentach pozwalają na analizę dokładności stosowanych przez ówczesnych mierniczych w kontekście metod pomiarowych i sprzętu.

● WYKOPALISKA

Równoległe z pracami pomiarowymi na terenie całego miasta prowadzone są regularne wykopaliska skoncentrowane w jednej z insul, kryjącej pozostałości zabudowy mieszkalnej. W obrębie odsłonię-



Monumentalny plac Cystern; plan archiwalny z 1828 roku autorstwa braci Beechey (z lewej), ucyfrowane zdjęcie lotnicze – stan obecny (z prawej)

tej powierzchni (ponad 1500 m kw.) zlokalizowane zostały jak dotąd cztery domy mieszkalne, w tym dwa prawie całkowicie odkopane. W trakcie badań nad architekturą analizowane są układy pomieszczeń, wątki murów, rodzaje dekoracji oraz występujące zabytki. Wykopaliska prowadzone są od początku z użyciem tachimetru. Instrument orientowany w pobliżu wykopu służy w codziennej pracy archeologa. Jest używany przede wszystkim do inwentaryzacji odkopywanych elementów (ścian, posadzek, pojedynczych kamieni czy wreszcie zabytków luźnych, takich jak: monety, lampki oliwne, szkło, rzeźby). Poza tym wykorzystywany jest przy okazji tyczenia wykopów, pomiarów powierzchni pomieszczeń lub objętości podziemnych cystern.

Odkopywane obiekty dostarczają wielu informacji również z punktu widzenia całego miasta. Przykładem może być odsłonięcie granic insuli, które przetrwały niezmiennie od okresu hellenistycznego (III w. p.n.e.) do czasów bizantyjskich (VI w. n.e.). Możliwość prowadzenia precyzyjnych pomiarów, wyznaczania osi budowli, a następnie szukania podobnych rozwiązań w innych domach w Ptolemais są niezwykle cenne przy badaniu antycznej urbanistyki. Dodatkowo dane metryczne przeliczane są na oryginalny system stóp hellenistycznych i rzymskich, które stosowano jako moduły budowlane w starożytności.

Wykopaliska pomagają również przy interpretacji obrazów geofizycznych, dzięki odnajdowaniu i analizowaniu struktur widocznych na obrazach rastrowych podczas prospekcji terenu. W ten sposób weryfikowane są obszary zasypisk kamiennych, posadzki, pozostało-

ści pieców oraz koncentracje metali. Mając taką „legendę”, łatwiej interpretuje się mapy geofizyczne wykonywane w innych częściach miasta.

● REZULTATY BADAŃ W PTOLEMAIS

Efektom badań nieinwazyjnych jest mapa stanowiska archeologicznego, wielowarstwowy model numeryczny antycznego miasta. Kluczem do poprawności tego modelu jest konsekwentna lokalizacja jego elementów w ustalonym układzie współrzędnych. W Ptolemais stosowany jest układ lokalny z osią X skierowaną na północ, Y na wschód (dane z GPS dodatkowo są rejestrowane w układzie WGS84). Współrzędne mierzonych obiektów, ich parametry (długość, szerokość, wysokość, powierzchnia itp.) są elementami bazy danych MySQL uzupełnianej na serwerze danych oraz dołączanej do planu. Stosowanie filtrów graficznych i zapytań SQL pozwala na wybór aktualnie potrzebnych budowli o określonych cechach. Dzięki dostępności stworzonego modelu w internecie możliwa jest praca na nim z dowolnego punktu na Ziemi, również na wykopaliskach. Przykładowo aktualizacja odbywa się z poziomu prac terenowych w Ptolemais, a weryfikacja i szukanie analogii – w bibliotekach na całym świecie.

WIESŁAW MAŁKOWSKI
(Instytut Archeologii, Uniwersytet Warszawski)

Treść artykułu nawiązuje do referatu wygłoszonego na konferencji pt „Cyfrowa Przeszłość”, która odbyła się w maju 2009 roku na Uniwersytecie Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie