



Rozpoznanie proveniencji marmurów Wielkiej Fontanny z Perugia z pomocą statystyki fraktalnej, analizy teksturalnej i izotopowej

Ewa Słaby^{1,2}

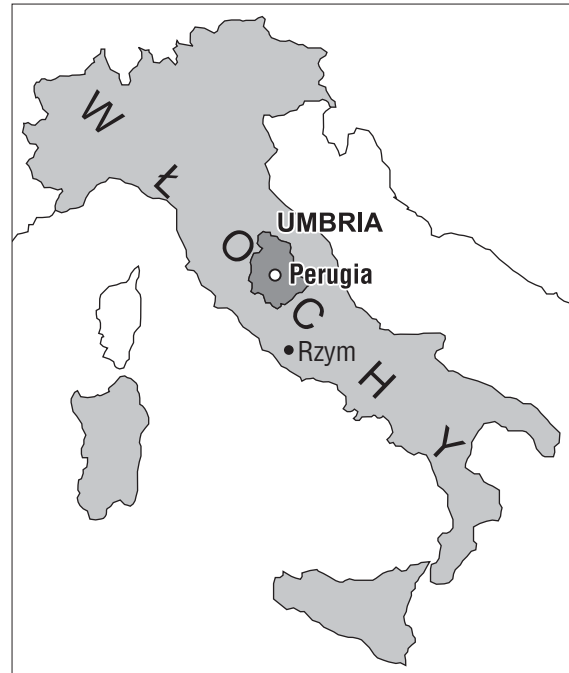


Słynna Fontana Maggiore z Perugia, stolicy Umbrii (Włochy), została postawiona dla upamiętnienia uwiecznionej sukcesem budowy akweduktu miejskiego, który doprowadzał wodę z oddalonej o 3 km miejscowości Monte Pacciano. Budowa była dużym i priorytetowym przedsięwzięciem dla władz miasta. Trwała aż 20 lat (1257–1277). Długi

okres prac był związany z ukształtowaniem terenu Umbrii (ryc. 1). Jest to pagórkowaty, miejscami górzysty region w środkowych Włoszech, od wschodu ograniczony Apeninami Umbryjskimi, z których spływają liczne rzeki. Dostatek wody sprzyja rozwojowi rolnictwa, stąd Umbria zwana jest *zielonym sercem Włoch*.

Geologicznie obszar Umbrii znajduje się w południowej części Apeninów Północnych, reprezentujących strukturalnie środkową część apenińskiego pasma fałdowo-nasunięciowego (Ager, 1980; Pauselli i in., 2006). Płaszczowiny apenińskie, nasunięte ku wschodowi i północnemu wschodowi na terran Adrii, są bardzo młode – całe pasmo jest strukturą neogeńską, z dobrze udokumentowanym ruchem jeszcze w plejstocenie. Region Umbrii budują płaszczowiny tokańskie (na zachodzie), nasunięte na jednostki Umbria-Marche (na wschodzie). Późnoneogeńska (plioceńska) aktywna ekstensja w wewnętrznej części Apeninów Północnych doprowadziła do powstania szeregu basenów śródgórskich o przebiegu NW-SE, w których gromadziły się miąższe sekwencje osadów lądowych i jeziornych (z bogatą fauną i florą). Działalność wulkaniczna, datowana na czas od 460 ± 20 do 265 ± 5 tys. lat, dodała do litologii obszaru maficzne potoki lawy i różnorodne osady piroklastyczne. Skały osadowe, a szczególnie wapienie i trawertyny, oraz maficzne skały magmowe licznie pojawiają się w architekturze prowincji.

Fontana Maggiore powstała w relatywnie krótkim czasie dwóch lat (1277–1278), choć woda popłynęła w niej dużo później. Dziś stanowi jeden z najpiękniejszych zabytków późnego średniowiecza we Włoszech. Jej konstrukcja to dwa poligonalne baseny, jeden umieszczony nad drugim (ryc. 2). Oba baseny są bogato zdobione, całość zwieńczona jest czaszą i grupą figuralną z brązu złożoną z trzech nimf. Do budowy systemu hydraulicznego i stworzenia zdobień zatrudniono znanych mistrzów. Fontannę zbudowano z naturalnych materiałów – wapieni i trawertynów. Dekoracje obu basenów zostały wykonane w marmurze. Ich autorami i wykonawcami byli Nicola i Giovanni Pisano (ojciec i syn) – słynna para włoskich rzeźbiarzy. Tematyka



Ryc. 1. Włochy z zaznaczonym regionem Umbrii – jedyną włoską prowincją bez dostępu do morza

dekoracji nie była przypadkowa (Mancini & Casagrande, 1982). Dolny basen został podzielony na 25 sekcji, a każda sekcja na dwa panele. Dwanaście sekcji przedstawia pory roku, 12 miesięcy i ludzki trud związany z pojawianiem się każdego z nich. Każdy miesiąc jest więc scenką rodzajową nawiązującą do czynności wykonywanych w odpowiednich porach roku, w harmonii z otaczającą człowieka przyrodą.

Jest tu m.in. lutowy połów ryb, jeździec z majowym bukietem wiosennych kwiatów, czerwcowe żniwa, sierpniowy zbiór owoców, wrześniowe wyciskanie soku z winogron czy wreszcie gwiazdkowe świniobicie. Każda scenka kalendarza zaopatrzona jest również w znak zodiaku. Tematyka pozostałych sekcji jest zróżnicowana. Jedna z nich przedstawia gryfa (godło Perugia) i lwa, czyli godło partii gwelfów (ryc. 3A). Inne pokazują dyscypliny wiedzy: gramatykę i dialektykę, retorykę i arytmetykę, geometrię i muzykę, astronomię i filozofię. Jest wśród sekcji grzech pierworodny i wypędzenie z raju (ryc. 3B), Samson i Daliła, Dawid i Goliat, wilczyca z Romulusem i Remusem i in. Jest sekcja z człowiekiem bijącym lwiatko i obserwowującym go poirytowanym lwem; *si vis ut timeat leo, verbera catulum* – co w swobodnym tłumaczeniu oznacza: *jeśli chcesz*

¹Institut Nauk Geologicznych, Polska Akademia Nauk, ul. Twarda 51/55, 00-818 Warszawa; e.slaby@twarda.pan.pl

²Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa



Ryc. 2. Fontana Maggiore

zdeńrować lwa, uderz w jego potomstwo (ryc. 3C). Sceny przedstawione na panelach są scenami łączącymi *sacrum* i *profanum*. Podobną filozofię prezentują figury okalające basen górny. Wśród *profanum* pojawia się kobieta z rogiem obfitości, symbolizująca Perugię, kobieta z rybą, symbolizująca jezioro Trasimeno (Trazymeńskie), podesta Perugii (wg Wikipedii: w niektórych średniowiecznych włoskich republikach miejskich najwyższy urzędnik o uprawnieniach sędziowskich i wojskowych) z insygniami władzy. Po stronie *sacrum* pojawiają się figury świętych, postaci ze Starego Testamentu i wreszcie personifikacje, np. kościoła rzymskiego i in.

Piękno przesłania artystycznego fontanny miało dorównać przesłaniu politycznemu, równie ważnemu. Jej za-



Ryc. 3. Rzeźby sekcji basenu dolnego; A – godła Perugii (gryf) i partia gwelfów (lew); B – grzech pierworodny i wypędzenie z raju; C – *si vis ut timeat leo, verbera catulum*. Rzeźby we wszystkich trzech sekcjach wykonane są w marmurze. Tekstura użytych skał (A, B, C) jest różna. Są to marmury pochodzące z trzech różnych złóż

daniem było uzmysłowić widzowi obraz miasta stojącego u szczytu potęgi polityczno-ekonomicznej, jego bogactwo, kulturę. Alians partii gwelfów z Rzymem wpływał silnie na dynamiczny rozwój miasta i pod koniec XIII w. Perugia osiągnęła szczyt rozkwitu. Jednocześnie elementy *sacrum* i *profanum* zawierały pewną filozofię. Na płaskorzeźbach pojawiają się postacie historyczne, postacie świętych, postacie biblijne i mityczne. Ten osobliwy zbiór wskazywał na możliwość rekoncylacji pomiędzy człowiekiem a boskością, pomiędzy historią a religią.

Do budowy fontanny użyto skał wapiennych, w tym marmurów i trawertynów. O ile kamieniołomy trawertynu niemalże otaczają miasto (jego złoża występują bowiem zarówno w Umbrii, jak i w Toskanii i w Lacjum), o tyle marmury ewidentnie zostały sprowadzone do Perugia. Rozpoznanie ich proveniencji jest szczególnie ważne ze względu na konieczność konserwacji obiektu i uzupełniania ubytków materiału skalnego.

Uważny rzut oka na trzy fotografie paneli z rzeźbami pozwala na stwierdzenie, że użyty materiał stanowi trzy różne gatunki marmuru, trzy różne litotypy. Marmur pokazany na ryc. 3A jest śnieżno- do perłowobiałego, prezentuje teksturę drobno- do średnioziarnistej, z drobnymi szarawymi plamkami lub lekko zdeformowanymi szarawymi żyłkami (litotyp 1, Moroni i in., 2002). Grzech pierworodny i wypędzenie z raju (ryc. 3B) wyrzeźbione zostały w marmurze perłowobiałym, średnioziarnistym, ze złotawymi, miejscami lśniąco- żyłkami (litotyp 2, *op.cit.*), a ilustracja przysłowia o lwie (ryc. 3C) – w marmurze białym, średnio- do gruboziarnistego, z szarymi przewarstwieniami (litotyp 3, *op.cit.*). Podczas gdy litotypy 1 i 3 zostały powszechnie użyte do wykonania dekoracji fontanny, litotyp 2 jest bardzo rzadki. Proveniencja wszystkich trzech typów jest nieznana. W czasie powstawania fontanny było czynnych wiele greckich kamieniołomów marmuru. Szczególnie znane są marmury z Paros, z Góry Pentelikus, którym były obłożone najważniejsze budowle z czasów Peryklesa – Partenon, Propyleje, Erechtejon, świątynia Zeusa (Acocella, 2006). Rzymianie jako materiał zdobniczy szczególnie upodobali sobie właśnie marmury greckie – sprowadzali je na Półwysep Apeniński już w III w. p.n.e. Próbkę skał z kamieniołomów Thassos, Naxos i Paros, wydobywanych od VI w. p.n.e., zostały pobrane do badań porównawczych przez zespół petrologów z uniwersytetów w Perugii i La Sapienza w Rzymie. Zaproponowali oni zupełnie nową metodę rozpoznania proveniencji z użyciem analizy teksturalnej, fraktalnej i izotopowej (Moroni i in., 2002).

Dotychczas stosowane metody identyfikacji pochodzenia materiału skalnego opierają się przede wszystkim na użyciu zróżnicowanego warsztatu geochemiczno-petrologicznego. We Włoszech w badaniach nad proveniencją marmuru stosowano kryteria mineralogiczne i petrologiczne, analizę geochemiczną, elektronowy rezonans spinowy, katodoluminescencję i analizę izotopową (zob. Moroni i in., 2002 i cytowania tamże).

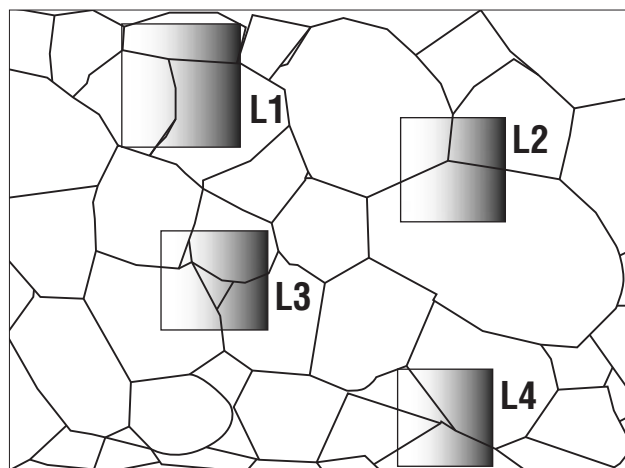
Jak już wspomniałam, nowy schemat oparty jest na analizie izotopowej, teksturalnej i dalszym jej wykorzystaniu w analizie fraktalnej. Dokładny opis teksturalny, szczególnie kształtu ziaren i typu kontaktów pomiędzy ziarnami, jest szczególnie ważny dla tej ostatniej. Sporządzenie rycin z zarysem kształtu ziaren i ich kontaktów (co najmniej

100–200 ziaren) na podstawie zdjęć mikroskopowych stanowi bazę danych wejściowych do analizy fraktalnej. Obraz przed analizą zamieniany jest na rastrowy obraz binarny. Sukces użycia takiej metody zależy od zróżnicowania tekstur badanych próbek – im jest ono większe, tym większa szansa na identyfikację proveniencji. Trzy badane przez Moroni i jej współpracowników litotypy charakteryzowały się odmienną teksturą (*op.cit.*). Litotyp 1 wykazywał homeoblastyczną teksturę złożoną z równoziarnistej mozaiki kryształów kalcytu. Kontakt ziaren był prosty lub lekko krzywoliniowy. Tekstura litotypów 2 i 3 była natomiast heteroblastyczna, a kontakt ziaren – prosty do krzywoliniowego w litotypie 2 i liniowy do ząbwiącego się w litotypie 3.

Analiza rastrowego obrazu binarnego została przeprowadzona z użyciem programu *ImageTool 2.00*. Skalkulowano takie parametry jak: powierzchnia ziaren, perymetr, wydłużenie ziaren oraz gęstość ziaren ρ (czyli ilość ziaren podzieloną przez ich powierzchnię całkowitą wyrażoną w pikselach obrazu). Właśnie tę ostatnią wielkość ρ użyto do analizy fraktalnej. W analizie posłużono się funkcją gęstości prawdopodobieństwa PDFM (*Probability Density Function Method* wg Vossa, 1988). Funkcja gęstości prawdopodobieństwa jest funkcją rzeczywistą pozwalającą wyrazić prawdopodobieństwo wystąpienia dowolnego zdarzenia B przy pomocy wartości całki Lebesgue'a z tej funkcji po zbiorze B (za Wikipedią). Autorem pomysłu wykorzystania jej do opisu zróżnicowania próbek był Perugini (Perugini i in., 2002), znany ze stosowania teorii fraktalnej do opisu niektórych zjawisk w geologii. W przypadku zastosowania tej funkcji do analizy różnic teksturalnych próbek określaną była gęstość prawdopodobieństwa ρL , gdzie ρ jest gęstością ziaren, a L długością kontaktu. Pozyskiwanie danych L obrazuje rycina 4. Wybrane cztery okna kwadratowe pokazują zróżnicowaną długość styku ziaren. Okna przemieszczane są sukcesywnie ponad każdym pikselem obrazu, gdzie piksel oznacza podzbiór ziaren kalcytu w marmurze. Dla danego L pierwszy moment funkcji jest zdefiniowany następująco:

$$M(L) = \sum n\rho L$$

gdzie:
 n – ilość zliczeń.



Ryc. 4. Schematyczny obraz binarny próbki z zaznaczonymi czterema oknami o odmiennej długości L

Zależność pomiędzy wymiarem fraktalnym a $M(L)$ jest wyrażona funkcją:

$$\log[M(L)] = D \log(L) + \log(k)$$

gdzie:

D – wymiar fraktalny,

k – stała.

Jedynym oznaczeniem geochemicznym proponowanym przez zespół badaczy jest analiza izotopowa. Oznaczono izotopy tlenu i węgla ($\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^{13}\text{C}$) we wszystkich badanych próbkach z fontanny oraz złóż marmurów greckich. Rozrzut wartości izotopów tlenu był większy niż węgla, dlatego użyto go do analizy porównawczej i porównano z parametrami uzyskanymi z analizy obrazu (odchylenia standardowego powierzchni ziarna) oraz wymiaru fraktalnego (D). Wyniki analiz pokazały, że trzy typy marmurów tworzą populacje danych niezazębiających się – wobec czego istotnie pochodzą z trzech różnych złóż. Próbkę pobraną ze starożytnych kamieniołomów Thassos, Naxos i Paros charakteryzują się zupełnie odmiennymi parametrami niż te ustalone dla trzech litotypów. Najbliżej spokrewniona z litotypem 3 okazała się próbka z Naxos. Jej charakterystyka jest pośrednią pomiędzy litotypami 1 i 3. Prawdopodobieństwo, że materiał z Naxos został użyty w panelach fontanny, było niewielkie. Użycie materiału z dwóch pozostałych kamieniołomów zupełnie wykluczono. Dla ostatecznego potwierdzenia lub wykluczenia obecności marmuru z Naxos użyto badań w katodoluminescencji. Marmur z Naxos charakteryzował się pomarańczową luminescencją, podczas gdy litotyp 3 ciemnoniebieską.

Opisana procedura postępowania dla odtworzenia pochodzenia materiału jest ciekawym przykładem kombina-

cji metod. Mimo że opisany przykład badań zakończył się tylko połowicznym sukcesem (pewne kamieniołomy zostały wyeliminowane z listy potencjalnych dostawców marmuru), to jednak schemat badań jest godny uwagi. Szczególnie statystyka fraktalna jest dużym *novum*. Do tej pory stosowano ją do opisu procesów chaotycznych w geologii – takich jak proces mieszania magm lub dynamiczna krystalizacja faz. Użycie statystyki fraktalnej do opisu więzby skały w powiązaniu z analizą innych parametrów – teksturalnych, a także geochemicznych – może otworzyć nowy dział w metodologii stosowanej do ustalenia proveniencji skał.

Autorka pragnie podziękować prof. G. Poliemu i dr. D. Peruginiemu za wprowadzenie w tematykę proveniencji marmurów fontanny oraz za oprowadzenie po zabytkach Perugii ze szczególnym uwzględnieniem Fontany Maggiore.

Literatura

- ACOCELLA A. 2006 – Stone architecture: ancient and modern construction skills. Milano.
- AGER D.V. 1980 – The geology of Europe. McGraw-Hill Book Company, London.
- MANCINI F.F. & CASAGRANDE G. 1982 – Perugia – Historical and Artistic guide. Italcad.
- MORONI B., PERUGINI D., POLI G. & TURI B. 2002 – Characterization of marbles by textural analyses and stable isotope geochemistry: examples from the „Fontana Maggiore” of Perugia (Italy). Atti del II Congresso Nazionale di Archeometria, Estratto, Bologna: 437–446.
- PAUSELLI C., BARCHI M.R., FEDERICO C., MAGNANI M.B. & MINELLI G. 2006 – The crustal structure of the Northern Apennines (Central Italy): an insight by the CROP03 seismic line. Amer. J. Sci., 306: 428–450.
- PERUGINI D., MORONI B. & POLI G. 2002 – Characterization of marble textures by image and fractal analysis. Proc. of ASMOSIA: 241–246.
- VOSS R.F. 1988 – Fractals in nature: from characterization to simulation. [In:] Peitgen H.O. & Saupe D. (eds.) The science of fractal images. Springer, Berlin: 21–70.