

PAWEŁ PĘDZICH, KAMIL LATUSZEK
Zakład Kartografii Politechniki Warszawskiej
ppedzich@gik.pw.edu.pl
kamil.latuszek@wp.pl

Kartografia planetarna – przykłady opracowań, odwzorowania kartograficzne, nowe wyzwania

Z a r y s t r e ś c i. Jest to drugi artykuł przybliżający problematykę z zakresu kartografii planetarnej. Przedstawiono przykłady wykonywanych na świecie prezentacji kartograficznych, m.in. fotomosaiki, mapy albedo, mapy topograficzne, globusy (także wirtualne) oraz opracowania typu GIS różnych ciał niebieskich, takich jak Księżyc, planety oraz ich księżyce, a także asteroidy. Ponadto scharakteryzowano odwzorowania kartograficzne stosowane do map obiektów pozaziemskich, zwracając szczególną uwagę na problemy występujące przy opracowaniu map obiektów nieregularnych, których kształt znacząco odbiega od sfery lub elipsoidy. Na zakończenie zasygnalizowano nowe wyzwania stojące przed kartografią planetarną wynikające z rozwoju technik pozyskiwania, analizowania i prezentacji coraz większej ilości danych oraz ze wzrostu zainteresowania opracowaniami kartograficznymi z tego zakresu.

S ł o w a k l u c z o w e: mapy planet, mapy księżyców, mapy asteroid, odwzorowania kartograficzne ciał niebieskich

1. Wstęp

Gwiazdziste nocne niebo zawsze wzbudzało zainteresowanie człowieka oraz było przedmiotem jego badań. Obserwowane gwiazdy katalogowano, mierzono ich położenie na sferze niebieskiej oraz opracowywano mapy. Pierwsze mapy nieba mają postać rysunków naskalnych. W miarę rozwoju nauki doskonalono metody obserwacji gwiazd, powstawały coraz dokładniejsze mapy, zawierające coraz większą liczbę obiektów. Przedmiotem pierwszych obserwacji astronomicznych i kartowania był Księżyc. Jednym z celów pierwszych misji kosmicznych było opracowanie dokładnych map tego naturalnego satelity Ziemi. Ciekawość i chęć zdobywania wiedzy o wszechświecie zaowocowała wysłaniem wielu misji

kosmicznych w celu badania znajdujących się w Układzie Słonecznym planet, asteroid i komet. Badaniom przyświecały różne cele, przede wszystkim poznanie rzeźby terenu, budowy geologicznej, składu chemicznego, ale także badanie możliwości występowania form życia na innych planetach oraz identyfikacja potencjalnych zagrożeń, np. przewidywanie kolizji asteroid z Ziemią. Mapy pełnią w tych badaniach istotną rolę, dają możliwość interpretacji zjawisk i obiektów, wyznaczania ich dokładnego położenia itp. Ze względu na coraz większą ilość dostarczanych danych, zapotrzebowanie na opracowania kartograficzne tego typu jest coraz większe.

Wśród opracowań kartograficznych ciał niebieskich możemy wyróżnić takie ich rodzaje, jak mapy albedo, topograficzne, geomorfologiczne, geologiczne, tektoniczne, hipsometryczne, a także atlasy i globusy (w tym wirtualne). Coraz częściej do wykonywania opracowań tego typu wykorzystuje się technologie GIS-owe. Ciała niebieskie Układu Słonecznego różnią się od siebie pod względem budowy geologicznej, rzeźby terenu oraz dokładności i rodzaju danych źródłowych, co rzutuje na dużą różnorodność produktów kartograficznych w zależności od mapowanego obiektu oraz przeznaczenia opracowania. Dość wyraźny jest podział na opracowania specjalistyczne oraz popularyzujące wiedzę. Wśród opracowań specjalistycznych dominują mapy tematyczne: geomorfologiczne, geologiczne itp., a także wieloarkuszowe mapy topograficzne w większych skalach. Do celów edukacyjnych i popularyzacji wiedzy stosuje się opracowania interaktywne, małoskalowe – obecnie najczęściej wirtualne globusy.

Mapy ciał niebieskich wymagają zastosowania różnorodnych odwzorowań kartograficznych. Największe trudności sprawiają kartografom odwzorowania obiektów o wyraźnie nieregularnych kształtach. Jeżeli chcemy uzyskać wysoką dokładność zobrazowania ich powierzchni, stosowanie standardowych odwzorowań kartograficznych bywa niewystarczające. Dlatego problem doboru odpowiednich odwzorowań kartograficznych pojawia się często w badaniach z zakresu kartografii planetarnej.

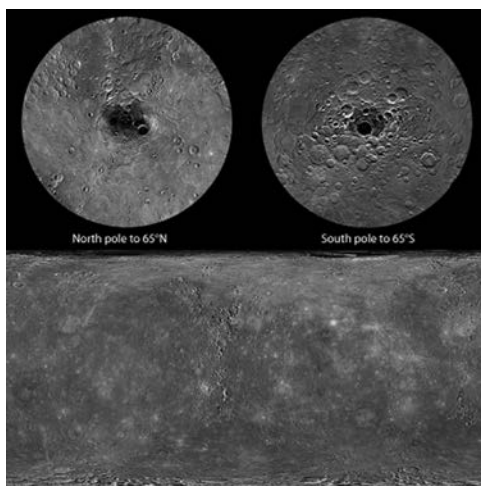
Obecnie wylania się potrzeba wprowadzenia szerokiej standaryzacji w zakresie interpretacji i klasyfikacji obiektów topograficznych oraz metod prezentacji kartograficznej, w tym ujednoczenia systemu znaków kartograficznych map specjalistycznych. Wprowadzenie scentralizowanych repozytoriów wspartych odpowiednią strukturą metainformacyjną pozwoliłoby ułatwić i poszerzyć dostęp do produktów kartografii planetarnej zarówno zwykłym jak i specjalistycznym użytkownikom. Zgodnie z postanowieniami międzynarodowymi wiedza o obiektach pozaziemskich powinna być powszechna – kartografia planetarna ma do odegrania znaczącą rolę w tym zakresie.

2. Przykłady opracowań z zakresu kartografii planetarnej

Zbiór globalnych monochromatycznych mozaik powierzchni Merkurego, udostępnionych poprzez System Danych Planetarnych NASA (Planetary Data System – PDS), pozwolił na przygotowanie obrazu bazowego do wykonania globalnej fotomozaiki tej planety (ryc. 1). Obszary okołobiegunowe odwzorowano stereograficznie (graniczne szerokości geograficzne: 65°S, 65°N). Obszar całej planety przedstawiono w odwzorowaniu równokątnym walcowym. Maksymalna rozdzielczość mapy wynosi 250 m/piksel.

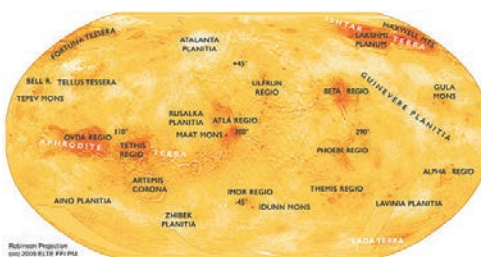
Na rycinie 2 przedstawiono małoskalowy obraz topografii planety Wenus w odwzorowaniu Robinsona, opracowany na podstawie danych zebranych w ramach misji Magellan. Nazewnictwo obiektów topograficznych dostępne jest w dwóch wersjach językowych: po węgiersku i po łacinie. Autorem opracowania jest H. Hargitai (Instytut Geografii i Nauk o Ziemi Uniwersytetu Eötvösa Loránda w Budapeszcie).

Wielojęzyczna mapa Księżyca w wydaniu środkowoeuropejskim (ryc. 3) przedstawia



Ryc. 1. Globalna fotomozaika Merkurego wykonana na podstawie obrazów pozyskanych przez misję MESSENGER. Mapa przygotowana przez NASA, Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, Carnegie Institution of Washington (źródło: http://messenger.jhuapl.edu/the_mission/mosaics.html)

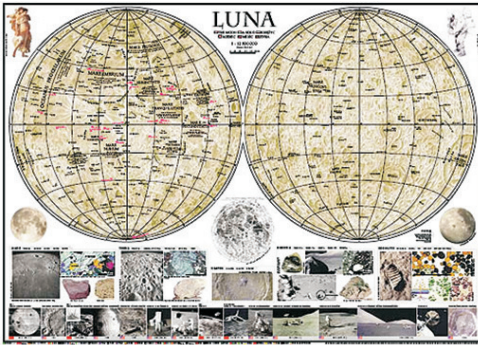
Fig. 1. Global photo mosaic of Mercury based on images obtained by the MESSENGER mission. Map created by NASA Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, Carnegie Institution of Washington (source: http://messenger.jhuapl.edu/the_mission/mosaics.html)



Ryc. 2. Mapa topograficzna Wenus w odwzorowaniu Robinsona – wersja z nazewnictwem łacińskim (źródło: http://planetologia.elte.hu/ipcd/ipcd.html?cim=robinson_venus)

Fig. 2. Topographic map of Venus in Robinson projection – version with Latin nomenclature (source: http://planetologia.elte.hu/ipcd/ipcd.html?cim=robinson_venus)

jego widoczną i niewidoczną stronę w skali 1:12 800 000 w odwzorowaniu azymutalnym poprzecznym Lamberta. Rzeźba terenu przedstawiona jest metodą cieniowania. Nazwy



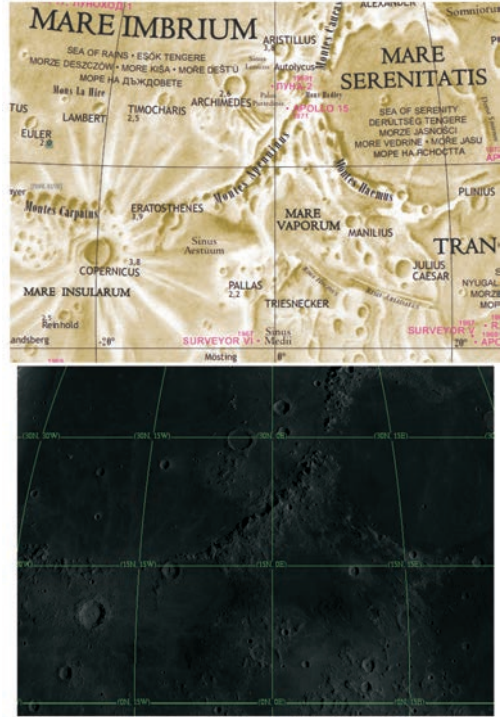
Ryc. 3. Wielojęzyczna mapa Księżyca wydana w 2002 roku przez Uniwersytet Eötvösa Loránda, redakcja Henrik Hargitai, nazewnictwo polskie Tomasz Kundera, Wojciech Ozimkowski (źródło: <http://planetologia.elte.hu/terkep/hold-full.pdf>)

Fig. 3. Multilingual map of the Moon published in 2002 by the Eötvös Loránd University (edited by Henrik Hargitai, Polish terminology Tomasz Kundera, Wojciech Ozimkowski) (source: <http://planetologia.elte.hu/terkep/hold-full.pdf>)

obiektów topograficznych podane są po łacinie, a nazwy większych mórz księżycowych przetłumaczono na pięć innych języków: angielski, czeski, polski, chorwacki i bułgarski. Na odwrotnej stronie mapy podano informacje geofizyczne o Księżycu (we wszystkich wymienionych językach).

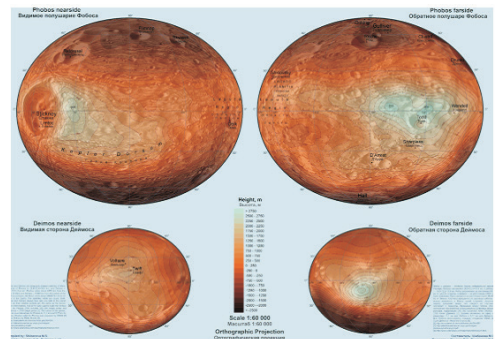
Na rycinie 4 przedstawiony jest fragment widocznej strony Księżyca, zawarty między równikiem a Morzem Deszczów i Morzem Jasnoci. W górnej części ilustracji umieszczono powiększenie omówionej wyżej wielojęzycznej mapy tradycyjnej, natomiast dolna część ilustracji pokazuje obraz widoczny na mapie wirtualnej, do której opracowania wykorzystano dane zgromadzone przez amerykańską sondę kosmiczną Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO). Dla mapy tej przyjęto odwzorowanie ortograficzne poprzeczne, co powoduje pewne różnice kształtu i wzajemnego położenia obiektów topograficznych.

Przykładem map hipsometrycznych ciał niebieskich są mapy przygotowane przez zespół: E. Grishakina, E. Lazarev, M. Lazareva. Mapy hipsometryczne księżyców Marsa w skali 1:60 000 są wykonane w odwzorowaniu ortograficznym obu półkul (ryc. 5). Kolorystyka hipsometrii odzwierciedla naturalne barwy tych satelitów, przy czym zmiana barw następuje co 500 m.



Ryc. 4. Porównanie tradycyjnej mapy Księżyca (u góry) oraz mapy wirtualnej Księżyca wykorzystującej dane misji LRO (u dołu) (źródło: <http://target.lroc.asu.edu/q3/#> oraz <http://planetologia.elte.hu/terkep/hold-full.pdf>)

Fig. 4. Comparison of a traditional map of the Moon (upper image) and a virtual map of the Moon (bottom image) based on data from the LRO mission (source: <http://target.lroc.asu.edu/q3/#> and <http://planetologia.elte.hu/terkep/hold-full.pdf>)



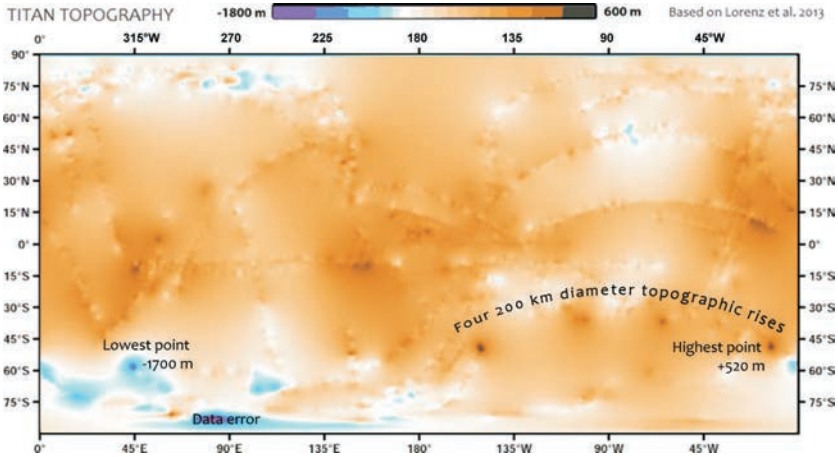
Ryc. 5. Mapy hipsometryczne półkul Phobosa (na górze) i półkul Deimosa – księżyców Marsa (E. Grishakina i inni 2013)

Fig. 5. Hypsometric maps of the hemispheres of Phobos (top) and Deimos (bottom) (E. Grishakina et al., 2013)

Podane są łacińskie i rosyjskie nazwy form rzeźby terenu (E. Grishakina i inni 2013).

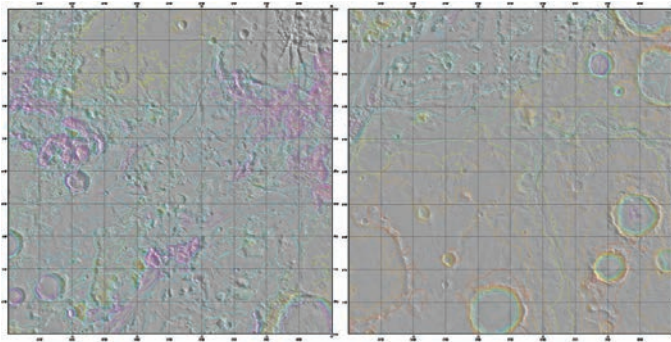
Międzynarodowy zespół złożony z dziesięciu instytucji, prowadzony przez Ralpa D. Lorenza z Uniwersytetu Johna Hopkinsa zaprojektował

Podczas XXVI Międzynarodowej Konferencji Kartograficznej w Dreźnie w 2013 roku (<http://www.icc2013.org/>) chiński kartograf Lingli Mu zaprezentował opracowane na podstawie danych zebranych przez statek kosmiczny



Ryc. 6. Mapa Tytana wykonana przez H. Hargitai na podstawie mapy bazowej DEM opublikowanej przez R.D Lorenza (2013) (źródło: http://planetcarto.files.wordpress.com/2013/05/titan_map_topo.jpg)

Fig. 6. Map of Titan created by H. Hargitai basing on DEM base map published by R.D. Lorenz (2013) (source: http://planetcarto.files.wordpress.com/2013/05/titan_map_topo.jpg)



Ryc. 7. Wielkoskalowe opracowanie powierzchni Marsa (K. Kirk i inni 2001)

Fig. 7. Large-scale study of the surface of Mars (K. Kirk et al., 2001)

tował pierwszą topograficzną mapę Tytana przedstawiającą cały obiekt (ryc. 6). Jako źródło posłużyły dane radarowe sondy Cassini (RADAR SARTopo) w połączeniu z danymi altymetrycznymi. Mapa w 90% jest wynikiem interpolacji tych danych (R.D. Lorenz 2013).

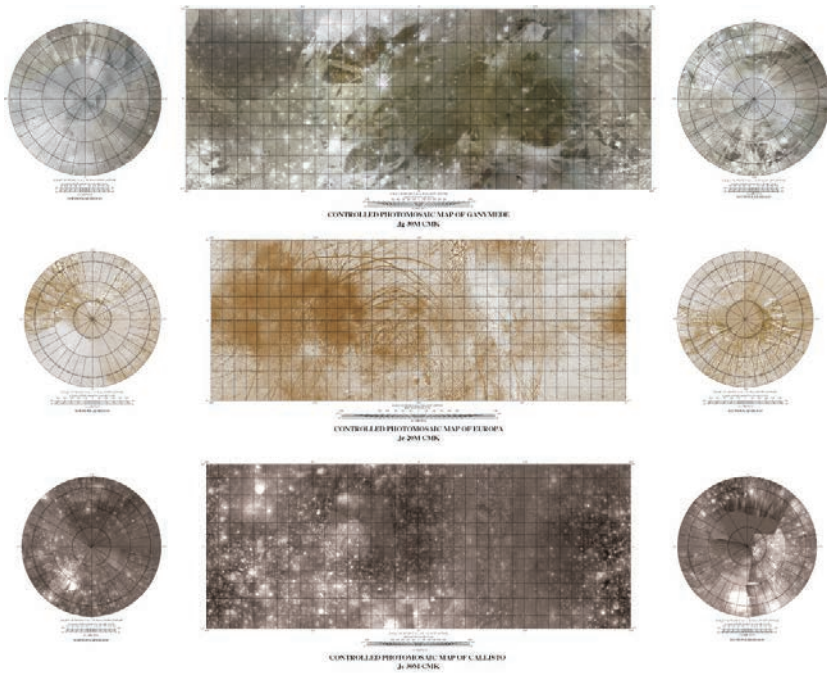
Chang'E-2 interaktywne mapy o zasięgu globalnym: fotomozaikę oraz hipsometryczną mapę Księżyca. Mapa interaktywna jest dostępna on-line za darmo pod adresem: <http://159.226.88.30:8080/CE2release/cesMain.jsp>.

Na rycinie 7 widzimy przykład wielkoskalowego opracowania topograficznego Marsa wykonanego w ramach programu mapowania geologicznego NASA. Przedstawione mapy poziomicowe są wynikiem przetworzenia NMT na dwóch przylegających arkuszach w skali 1:500 000. Linie poziomic są wynikiem stereoanalizy zdjęć z Viking Orbitera o rozdzielczości 200–250 m/piksel i dokładności wysokościowej 80–160 m. Część lewej mapy, gdzie uzyskano słabe pokrycie, opracowano z zastosowaniem wysokorozdzielczego NMT wykonanego metodami fotoklinometrycznymi. Obrazem bazowym była mozaika globalna MDIM 2.0 (K. Kirk i inni 2001).

Rycina 8 przedstawia mozaiki o zasięgu globalnym księżyców Jowisza: Ganimedesa,

nych do naturalnych i została przygotowana na podstawie trzykanałowych danych teledetekcyjnych misji Galileo oraz dwukanałowych misji Voyager, z jednokanałowym pokryciem w pobliżu biegunów. Mozaiki Europy i Kallisto wykonano na podstawie danych jednokanałowych (K. Kirk i inni 2001).

Przykładem globusa obiektu pozaziemskiego jest wykonany przez członków Komisji Kartografii Planetarnej Międzynarodowej Asocjacji Kartograficznej globus wulkanicznego księżycza lo znajdujący się w pomieszczeniu poświęconym Układowi Słonecznemu w muzeum wulkanicznym w Celldomok na Węgrzech. Ręcznie wykonany globus o średnicy 50 cm pokrywa fotomozaika oraz nazwy ważniejszych struktur powierzchniowych.



Ryc. 8. Mapy księżyców Jowisza: Ganimedesa, Europy, Kallisto (K. Kirk i inni 2001)

Fig. 8. Maps of Jupiter moons, from top to bottom: Ganymede, Europa, Callisto (K. Kirk et al., 2001)

Europy i Kallisto. Mapy wykonane w odwzorowaniu stereograficznym w położeniu normalnym oraz w odwzorowaniu Merkatora są przeznaczone do druku w skali 1:15 000 000. Mozaika Ganimedesa jest wykonana w barwach zbliżo-

Przeznaczenie komercyjne mają globusy Marsa o średnicy 30,5 cm, przygotowane przez Służbę Geologiczną Stanów Zjednoczonych (ryc. 9). Globus po lewej został wykonany na podstawie cyfrowej mozaiki o rozdzielczości



Ryc. 9. Globusy komercyjne Marsa (K. Kirk i inni 2001)

Fig. 9. Commercial globes of Mars (K. Kirk et al., 2001)

1 km/piksel (Viking Orbiter) zintegrowanej z danymi MDIM (Global Digital Image Mosaic of Mars) o rozdzielczości 231 m/piksel. Podkreślone są przede wszystkim szczegóły topograficzne planety. Globus po prawej wykonano z zastosowaniem hipsometrii na podstawie NMT opracowanego z pomiarów sondy Mars Global Surveyor (aparatus MOLA) (K. Kirk i inni 2001).

Ciekawym przykładem zestawu opracowań wirtualnych w kartografii planet są trzy globusy Marsa: historyczny, topograficzny oraz albedo, przedstawiający natężenie odbijanego światła od powierzchni (ryc. 10). Wirtualne globusy stanowią kontynuację i rozszerzenie serii „Multilingual Maps of Terrestrial Planets and their Moons” koordynowanej przez Komisję Kartografii Planetarnej MAK. Ich przeznaczeniem jest popularyzacja wiedzy o planetach. Nazewnictwu łacińskiemu (międzynarodowemu, ustalonym przez IAU) towarzyszą zatem nazwy nieformalne (nieoficjalne, choć często używane w publikacjach naukowych) w języku angielskim. Ponadto wprowadzone zostały odpowiednie treści pozaramkowe o charakterze edukacyjnym. Globus historyczny obrazuje natomiast albedo pokazane na czarno-białej ręcznie wykonanej mapie węgierskiej z 1878 roku, która z kolei wykonana została na podstawie o dwa lata starszej mapy C. Flammariona. Globus topograficzny wykonany jest na podstawie danych pozyskanych aparatem MOLA znajdującym się na pokładzie sondy Mars Global Surveyor. W odróżnieniu od map NASA i USGS, wykonując kompozycję barwną obrazującą wysokości zrezygnowano z wykorzystania kolorów niebieskiego i zielonego, które mogą być



Ryc. 10. Wirtualne globusy Marsa
(źródło: <http://planetologia.elte.hu/vrml>)

Fig. 10. Virtual globes of Mars
(source: <http://planetologia.elte.hu/vrml>)

kojarzone przez przeciętnego użytkownika ze zbiornikami wodnymi i roślinnością. Zamiast tego wykorzystano barwy białą, żółtą, pomarańczową i brązową, lepiej odzwierciedlające naturalne barwy planety. Globus wirtualny albedo (fotomozajka) wykonany został w odcieniach brązu na podstawie danych z aparatu Mars Orbiter Camera umieszczonego na pokładzie sondy Mars Global Surveyor (zdjęcia panchromatyczne z roku 1999). Globusy mają szeroką funkcjonalność interaktywną: można je obracać, zapisywać punkty widokowe, przybliżać się i oddalać od ich powierzchni. Możliwe jest również pobranie przez Internet odpowiedniego pliku w formacie jpg, na podstawie którego można wykonać globus fizyczny. Przygotowany jest również atlas predefiniowanych widoków ortograficznych planety (H. Hargitai, M. Gede 2009).

Innym przykładem globusa wirtualnego jest pokryty fotomozajką wirtualny globus Io (ryc. 11) znajdujący się w zbiorach Virtual Globes Museum, utrzymywany przez Wydział Kartografii i Geoinformatyki na Uniwersytecie Loranda Eötvösa w Budapeszcie. Nazewnictwo zaprojektowane jest dla skali 1:100 000 000. Rozmiar wydruku odpowiada średnicy 13 cm. Wirtualny globus może zostać ściągnięty przez Internet jako nakładka do programu Google Earth.

Przykładem interaktywnego systemu GIS poświęconego ciałom niebieskim jest system przygotowany dla Fobosa (ryc. 12), zapre-

zentowany podczas XXVI Międzynarodowej Konferencji Kartograficznej w Dreźnie w 2013 r. przez Irinę Karachevstevę, kierującą MexLab w Moskiewskim Państwowym Uniwersytecie Geodezji i Kartografii (MIIGAik). Interfejs sys-

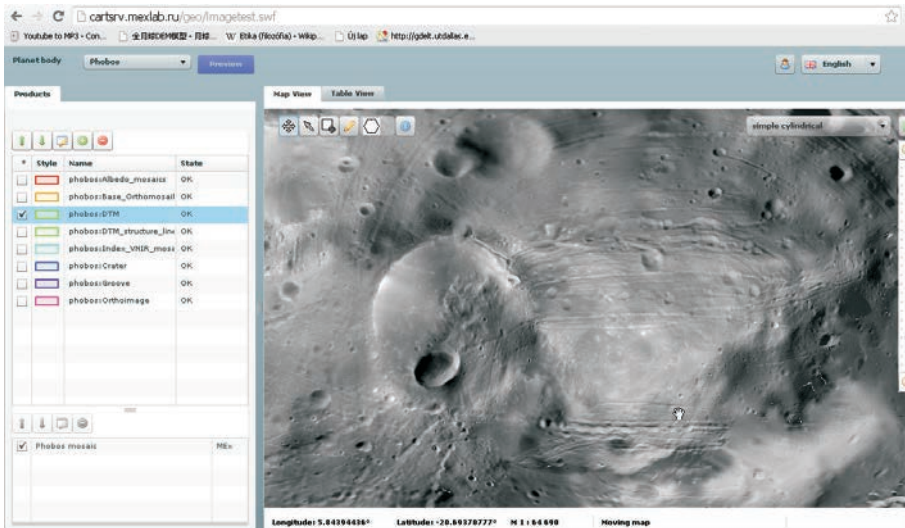
temu dostępny jest pod adresem: <http://cartsrv.mexlab.ru/geo/imagetest.swf>.

W Moskiewskim Państwowym Uniwersytecie Geodezji i Kartografii prowadzone są również prace nad GIS-em o nazwie „Solar System



Ryc. 11. Wirtualny globus Io (źródło: <http://terkeptar.elte.hu/vgm/2/?show=globe&id=111&descid=219>)

Fig. 11. Virtual globe of Io (source: <http://terkeptar.elte.hu/vgm/2/?show=globe&id=111&descid=219>)



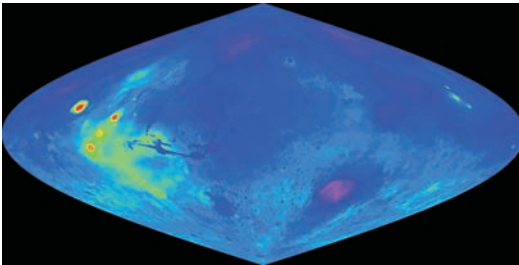
Ryc. 12. Interaktywny GIS ilustrujący powierzchnię Fobosa (źródło: http://planetcarto.files.wordpress.com/2013/08/miigaik_mexlab_map.jpg)

Fig. 12. Interactive GIS depicting the surface of Phobos (source: http://planetcarto.files.wordpress.com/2013/08/miigaik_mexlab_map.jpg)

Planets". System tego typu może w przyszłości umożliwić nie tylko kartowanie powierzchni planet, ale również gromadzenie, zarządzanie oraz analizę danych (np. wybór miejsc lądowania misji kosmicznych, przetwarzanie danych teledetekcyjnych). W wyniku tych prac powstał model danych planetarnych (Planetary Data Model – PDM) pozwalający na integrację danych przestrzennych z różnych źródeł. Dane będą przechowywane w jednej centralnej bazie danych w formacie umożliwiającym wykorzystanie ich przez wiele grup badawczych (E. Cherepanova i in. 2005).

3. Odzworowania kartograficzne stosowane do map ciał niebieskich

Opracowując mapy planet lub obiektów pozaziemskich takich jak księżycy planet lub asteroidy stosuje się zarówno tradycyjne, jak i niekonwencjonalne odzworowania kartograficzne. Niektóre z odzworowywanych obiektów, np. Mars, posiadają kształty zbliżone do kuli lub elipsoidy, a w związku z tym do ich kartowania można stosować odzworowania kartograficzne takie jak dla powierzchni Ziemi (ryc. 13).



Ryc. 13. Mapy Marsa: topograficzna w odzworowaniu Sansona (źródło: nssdc.gsfc.nasa.gov) i mapa albedo w odzworowaniu Robinsona (źródło: <http://planetologia.elte.hu/>)

Fig. 13. Maps of Mars: topographic in Sanson projection (source: nssdc.gsfc.nasa.gov), albedo map in Robinson projection (source: <http://planetologia.elte.hu/>)

Istnieje wiele obiektów mających nieregularne kształty odbiegające znacznie od elipsoidy lub kuli (np. księżycy Marsa – Fobos i Deimos); w tych przypadkach stosowanie konwencjonalnych rozwiązań staje się mało przydatne.

Zanim zastosujemy odzworowanie kartograficzne, niezbędne jest zdefiniowanie matematycznej powierzchni odniesienia oraz układu współrzędnych na niej.

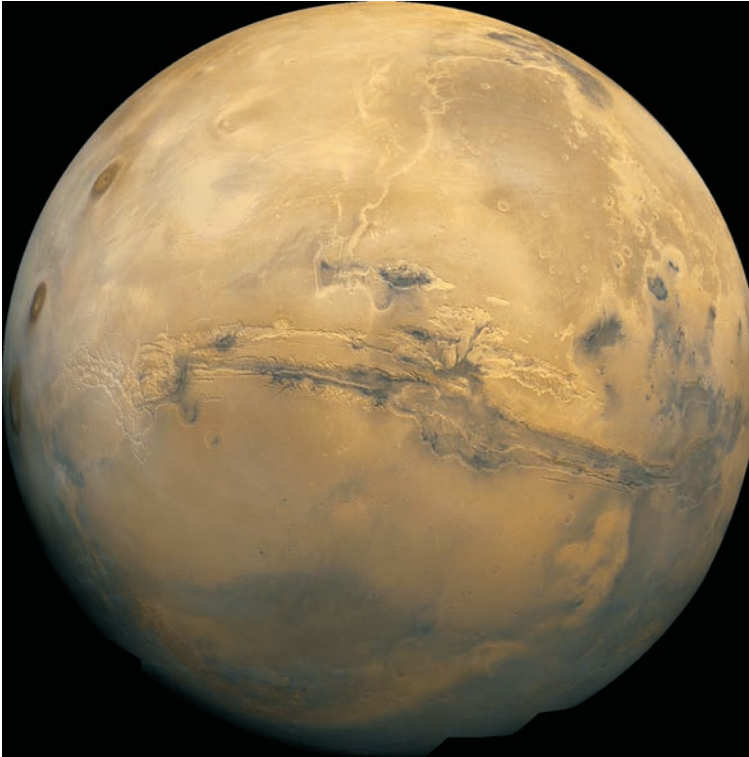
W przypadku takich obiektów pozaziemskich jak Księżyc lub Mars, które mają kształt zbliżony do elipsoidy, stosunkowo precyzyjnie wyznaczone ich powierzchnie odniesienia. Dla obiektów mających powierzchnię skalistą elipsoidy są definiowane poprzez osie obrotu i średni promień powierzchni bez atmosfery. Kształt Marsa (ryc. 14) przypomina jajko, w którym południowy i północny promień różnią się w przybliżeniu o 6 km. Jednak ta różnica jest na tyle mała, że do zdefiniowania elipsoidy przyjmuje się ich średni promień w kierunku biegunów. Ziemi Księżyc praktycznie jest kulisty. W przypadku planet gazowych takich jak Jowisz powierzchnia elipsoidy jest przyjmowana jako powierzchnia stałego ciśnienia równego jeden bar. Małe księżycy, asteroidy i komety często mają nieregularne kształty. Dla niektórych z nich, na przykład dla Io – księżycy Jowisza przyjmuje się trójosiową elipsoidę jako najlepszą aproksymację jego powierzchni.

Dla bardzo nieregularnych obiektów idea zastosowania elipsoidy jako powierzchni odniesienia jest bezużyteczna; najczęściej takie powierzchnie definiuje się poprzez zbiór punktów leżących na tej powierzchni. Wyznacza się współrzędne planetocentryczne tych punk-

tów oraz ich odległość od środka obiektu. Natomiast do opracowania map dobiera się odzworowania np. sfery, jednak dla każdego punktu podaje się inny promień. Nawet takie podejście może być niewystarczające dla nieregularnych powierzchni takich jak Eros (ryc. 15), na których szerokość i długość nie zawsze w sposób jednoznaczny identyfikuje pojedynczą lokalizację na powierzchni.

Dobór powierzchni odniesienia ma kluczowe znaczenie dla dokładnego przedstawienia na płaszczyźnie obiektów pozaziemskich o różnorodnych kształtach. Stosuje się elipsoidy wydłu-

tocentryczne lub planetograficzne definiowane analogicznie jak współrzędne geocentryczne i geograficzne (ryc. 17). Południk początkowy dobiera się tak, aby przechodził przez dobrze



Ryc. 14. Fotomozajka Marsa opracowana na podstawie zdjęć wykonanych przez sondę Viking 1
(źródło: <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/>)

Fig. 14. Photo mosaic depicting Mars, based on photographs taken by Viking 1 probe
(source: <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/>)

żone, trójosiowe, czteroosiowe, pięcioosiowe, a nawet sześćoosiowe. Możliwości zastosowania elipsoid czteroosiowej oraz sześćoosiowej do kartowania powierzchni nieregularnych obiektów przedstawili m.in. M. Nyrtsov, L. Bugaevsky i P. Strooke (2007).

Konstrukcja elipsoidy czteroosiowej lub sześćoosiowej jest stosunkowo prosta. Definiuje się różne długości półosi w czterech prostopadłych kierunkach. Na rycinie 16 przedstawiono elipsoidę sześćoosiową oznaczając półosie jako a , a' , b , b' , c , c' . Na powierzchni odniesienia wprowadza się układ współrzędnych. Najczęściej stosowane są współrzędne plane-

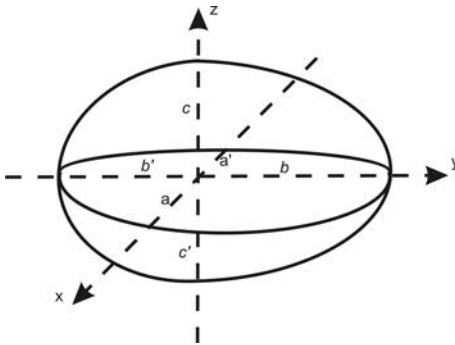
widoczny trwały obiekt na danej powierzchni. Jeżeli nie ma trwałego obiektu, wybór południka głównego jest dokonywany według reguł matematycznych.

Parametry elipsoidy wyznacza się na podstawie sieci punktów kontrolnych dających się jednoznacznie zidentyfikować na zdjęciach obiektu. K. Willner i współautorzy (2009) wyznaczyli sieć punktów dla Fobosa korzystając z danych obrazowych SRC (Super Resolution Channel) otrzymanych z sondy MEX (Mars Express). Punkty umieszczono w kraterach na powierzchni satelity. Wykorzystując sieć punktów wyznaczono model powierzchni oraz dyna-



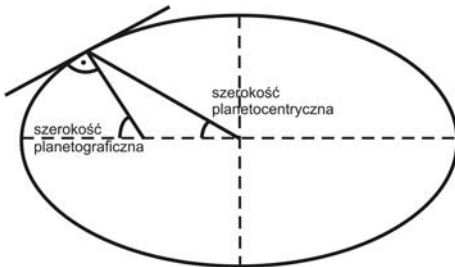
Ryc. 15. Mozaika przedstawiająca północną „półkulę” asteroidy Eros (433); zdjęcia wykonane przez sondę NEAR Shoemaker (źródło: <http://photojournal.jpl.nasa.gov>)

Fig. 15. Mosaic depicting the northern "hemisphere" of Eros asteroid (433); photographs taken by NEAR Shoemaker probe (source: <http://photojournal.jpl.nasa.gov>)



Ryc. 16. Elipsoida sześcioksiowa

Fig. 16. Six-axis ellipsoid



Ryc. 17. Szerokość planetocentryczna i planetograficzna

Fig. 17. Planetocentric and planetographic latitude

miczne i fizyczne parametry elipsoidy trójosiowej.

W przypadku powierzchni planet zbliżonych do kuli lub elipsoidy do kartowania stosuje się cały szereg różnych odwzorowań kartograficznych, dobierając je w analogiczny sposób jak dla powierzchni Ziemi. W przypadku powierzchni nieregularnych nieco inaczej podchodzi się do problemu przedstawienia tych powierzchni na płaszczyźnie.

Problem opracowania odwzorowań nieregularnych obiektów pozaziemskich pojawił się stosunkowo niedawno. Szczególną popularnością wśród kartografów planetarnych cieszą się dwa księżycy Marsa, mianowicie Fobos i Deimos (ryc. 18), obiekty o bardzo nieregularnych kształtach.

Pierwsze mapy Fobosa i Deimosa, ale też innych obiektów pozaziemskich, były opracowywane w tradycyjnych odwzorowaniach kartograficznych, w których stosowano kulę jako powierzchnię odniesienia – nie uwzględniały więc nieregularnego kształtu tych obiektów. T. Duxbury w 1974 r. do opracowania map Fobosa zastosował odwzorowanie Merkatora oraz dla obszarów podbiegunowych odwzorowanie stereograficzne według przyjętego przez NASA standardu dla globalnego kartowania Marsa i jego księżyców. P. Thomas w 1979 r. wykonał szczegółową mapę Fobosa i Deimosa na podstawie danych z sondy Viking. J. Snyder w 1985 r. opracował ściśle odwzorowanie konforemne walcowe dla elipsoidy trójosiowej aproksymującej kształt Fobosa. W swoich formułach J. Snyder nie zastosował współrzędnych planetocentrycznych, co spowodowało, że odwzorowania te są trudne do wykorzystania w praktyce dla powszechnie dostępnych zbiorów danych (M. Wahlsch i inni 2013).

Jako pierwszy, nieregularny kształt satelitów Marsa pokazał na swoich mapach P. Stooke. Zmodyfikował on tradycyjne odwzorowanie azymutalne pozwalając, aby promień w funkcjach odwzorowawczych zmieniał się z punktu do punktu na całej mapie, w każdym miejscu lokalny promień wyznaczył z modelu powierzchni. Tę metodę można zastosować do każdej powierzchni wliczając w to elipsoidę trójosiową. Wysokości uzyskuje się z cyfrowego modelu powierzchni. Ze względu na to, że odwzorowanie zaprojektowano do zilustrowania dokładnego kształtu obiektu, nosi ono nazwę odwzorowania morfograficznego (ryc. 19) (M. Wahlsch i inni 2013).

Radzieckie i rosyjskie mapy Fobosa i Deimosy opracowano w MIIGAIK w czasie planowania misji Phobos-1 i Phobos-2. Zastosowano

mapę. Mimo, że otrzymano w ten sposób dość dokładne odwzorowanie powierzchni obiektów, to jednak ze względu na nieregularny kształt

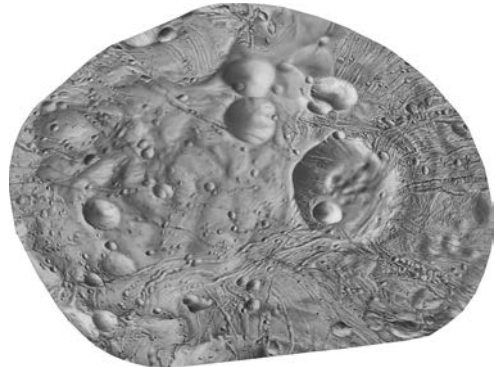


Ryc. 18. Fobos sfotografowany przez sondę Viking 1 oraz Deimos sfotografowany przez sondę Mars Reconnaissance Orbiter (źródło: nssdc.gsfc.nasa.gov oraz marsprogram.jpl.nasa.gov)

Fig. 18. Phobos photographed by Viking 1 and Deimos photographed by Mars Reconnaissance Orbiter (source: nssdc.gsfc.nasa.gov and marsprogram.jpl.nasa.gov)

dwa nowe odwzorowania elipsoidy trójosiowej: odwzorowanie konforemne walcowe dla obszarów wokół równika i średnich szerokości oraz odwzorowanie azymutalne równoodległościowe wzdłuż południków dla obszarów okołobiegunowych. Pierwsze zwane zmodyfikowanym odwzorowaniem Bugajewskiego pozwala reprezentować rzeczywisty kształt nieregularnej powierzchni obiektu (ryc. 20). Odwzorowanie to jest zbliżone do odwzorowania Merkatora: odstępy pomiędzy południkami i równoleżnikami zmieniają się tak jak odpowiadające im odległości na elipsoidzie (M. Wahlisch i inni 2013).

M. Berthoud (2005) jako jeden z pierwszych opracował mapy asteroid Eros i Kleopatra w odwzorowaniu równopolewym z uwzględnieniem ich nieregularnego kształtu. Zastosował przy tym oryginalną metodę polegającą na podziale powierzchni obiektu na małe czworoboki (wzdłuż siatki współrzędnych), a następnie odwzorowaniu ich na płaszczyznę z zachowaniem pola ich powierzchni. Opracowana w ten sposób mapa przedstawia obraz obiektu z zachowaniem przybliżonego kształtu linii ograniczającej



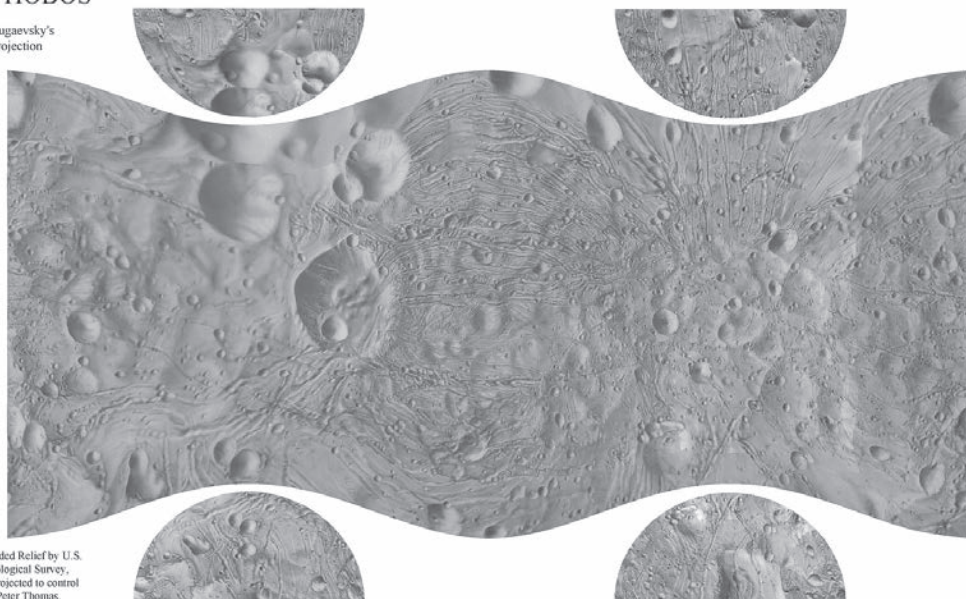
Ryc. 19. Fobos w odwzorowaniu morfograficznym konforemnym (źródło: http://sbn.psi.edu/pds/asteroid/EAR_A_3_RDR_STOOKEMAPS_V1_0/maps)

Fig. 19. Phobos in conformal morphographic projection (source: http://sbn.psi.edu/pds/asteroid/EAR_A_3_RDR_STOOKEMAPS_V1_0/maps)

siatki kartograficznej mapy te mogą zniechęcać potencjalnych użytkowników.

Próbie klasyfikacji odwzorowań nieregularnych obiektów pozaziemskich podjął w swojej

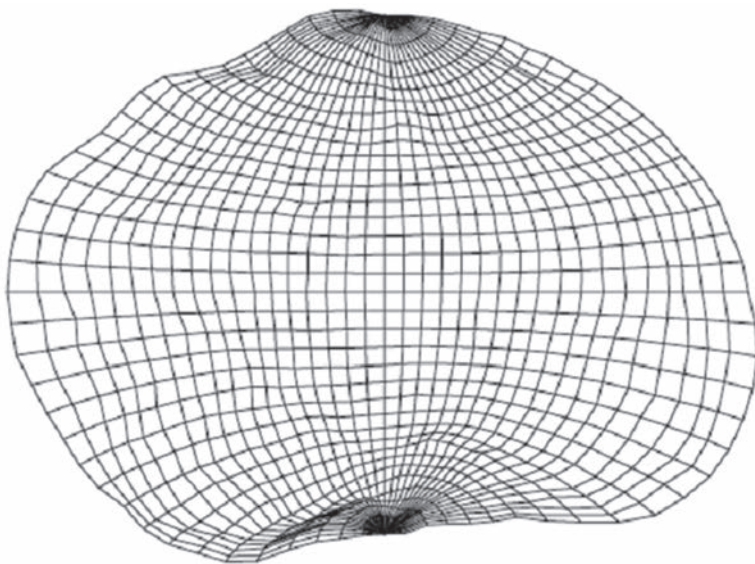
PHOBOS

Bugayevsky's
ProjectionShaded Relief by U.S.
Geological Survey,
reprojected to control
by Peter Thomas.

Philip J. Stooke, 1999

Ryc. 20. Fobos w odwzorowaniu Bugajewskiego (źródło: http://sbn.psi.edu/pds/asteroid/EAR_A_3_RDR_STOOKEMAPS_V1_0/maps)

Fig. 20. Phobos in Bugayevsky projection (source: http://sbn.psi.edu/pds/asteroid/EAR_A_3_RDR_STOOKEMAPS_V1_0/maps)



Ryc. 21. Siatka kartograficzna zachodniej „półkuli” Fobosa w odwzorowaniu Postela (M. Nyrtsov 2003)

Fig. 21. Cartographic grid of the western "hemisphere" of Phobos in Postel projection (M. Nyrtsov 2003)

pracy M. Nyrtsov (2003). Odwzorowania te możemy sklasyfikować w sposób następujący:

- odwzorowania klasyfikowane według kształtu obiektu,
- odwzorowania klasyfikowane według wielkości odwzorowywanego obszaru.

Według pierwszego kryterium odwzorowania możemy dalej podzielić na:

- odwzorowania obiektów, których kształt bardzo różni się od sfery, elipsoidy obrotowej, elipsoidy trójosiowej – obiektów o kształcie podobnym do ziemniaka (odwzorowania „ziemniakograficzne”, ang. *potatographic projection*),
- odwzorowania obiektów o podwójnym kształcie,
- odwzorowania kartograficzne obiektów charakteryzujących się wielościennym kształtem.

Rycina 21 przedstawia przykład odwzorowania „ziemniakograficznego”, a na rycinie 22 przedstawiono przykład odwzorowania karto-

wanie prostych połączonych obiektów z wykorzystaniem pojedynczego odwzorowania,

- poprzez zastosowanie zintegrowanych odwzorowań takich jak np. Goode’a.

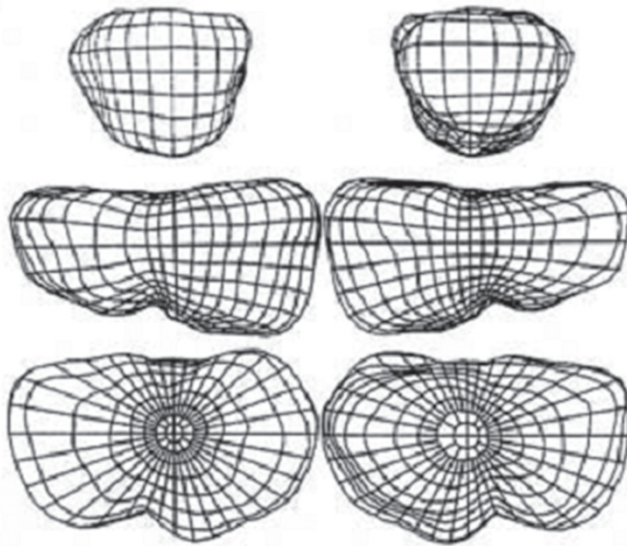
Odwzorowania według wielkości odwzorowywanego obszaru można podzielić na:

- odwzorowania całego obiektu (*planetary scale projections*),
- odwzorowania półkul,
- odwzorowania małych obszarów na mapach wielkoskalowych (*region scale projections*).

Mapy całego obiektu stosuje się do przedstawienia budowy geologicznej, rzeźby terenu lub albedo obiektu.

Obecnie stosowane są najczęściej następujące odwzorowania:

- ortograficzne,
- proste walcowe,
- zmodyfikowane walcowe Bugajewskiego dla elipsoidy trójosiowej,



Ryc. 22. Siatka kartograficzna w sześciu ortograficznych rzutach asteroidy 4769 Castalia (M. Nyrtsov 2003)

Fig. 22. Cartographic grid in six orthographic projections of the asteroid 4769 Castalia (M. Nyrtsov 2003)

graficznego obiektów o podwójnym kształcie.

Wyznaczanie odwzorowań kartograficznych charakteryzujących się wielościennym kształtem może być wykonywane na dwa sposoby:

- odwzorowanie obiektu o podwójnym kształcie może być rozważane jako odwzoro-

– klasa odwzorowań morfograficznych (azy-mutalnych, w których zastąpiono stały promień lokalnym promieniem z cyfrowego modelu rzeczywistej powierzchni).

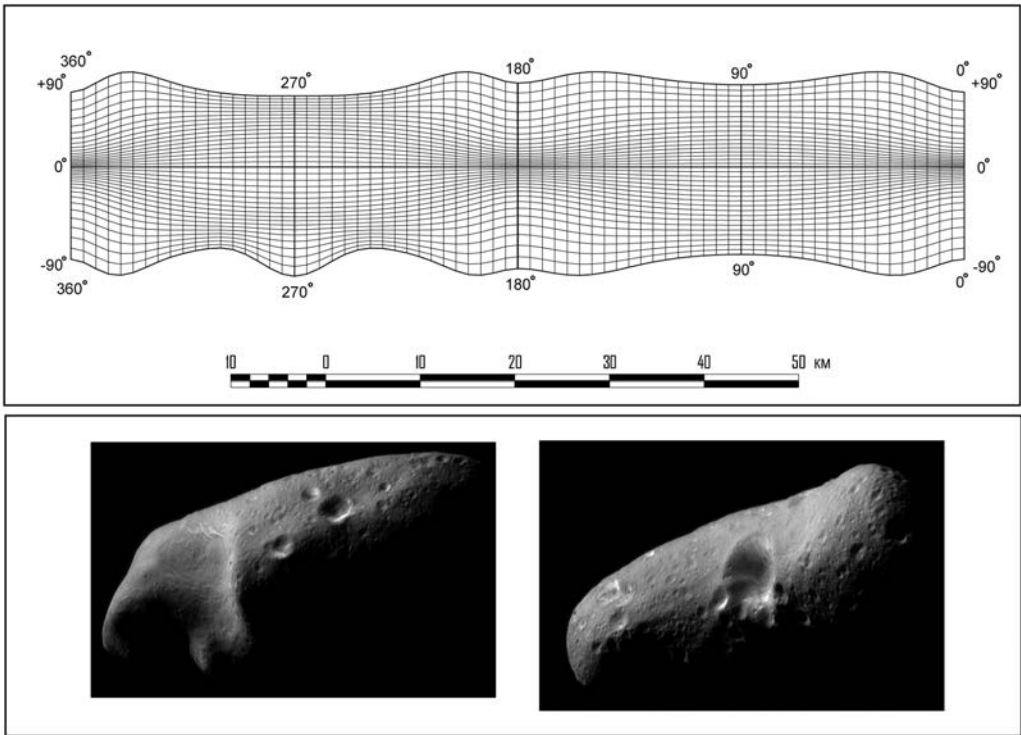
Do dokładniejszego zobrazowania powierzchni stosowane są także odwzorowania elipsoid czter- i sześciosiowych.

Jako jeden z pierwszych tego typu rozwiązanie zaprezentował w swojej pracy doktorskiej P. Stooke z Uniwersytetu Victorii. Na podstawie obrazów z misji Voyager opracował mapę Amalthei – satelity Jowisza. Jako powierzchnię odniesienia zastosował 4-osiową elipsoidę z osiami $a = 105$ km, $a' = 165$ km, $b = 83$ km, $c = 75$ km (gdzie c jest osią biegunową). Natomiast M. Nyrtsov, L. Bugaevsky i P. Stooke (2007) zaprezentowali mapę asteroidy Eros w odwzorowaniu walcowym równoodległościowym (ryc. 23), przyjmując jako

wanie walcowe równoodległościowe w kierunku południków,

- zmodyfikowane odwzorowanie izowalcowe,
- zmodyfikowane odwzorowanie Sansona,
- zmodyfikowane odwzorowanie Kawrajskiego (ryc. 24).

Do kartowania obszarów podbiegunowych stosuje się odwzorowania azymutalne perspektywiczne – ortograficzne (ryc. 25A), gnomoniczne, stereograficzne oraz ich modyfikację zaproponowaną przez P. Stooke'a – odwzorowania morfograficzne.



Ryc. 23. Siatka kartograficzna asteroidy Eros w odwzorowaniu walcowym równoodległościowym elipsoidy sześcioośiowej (M. Nyrtsov i inni 2007)

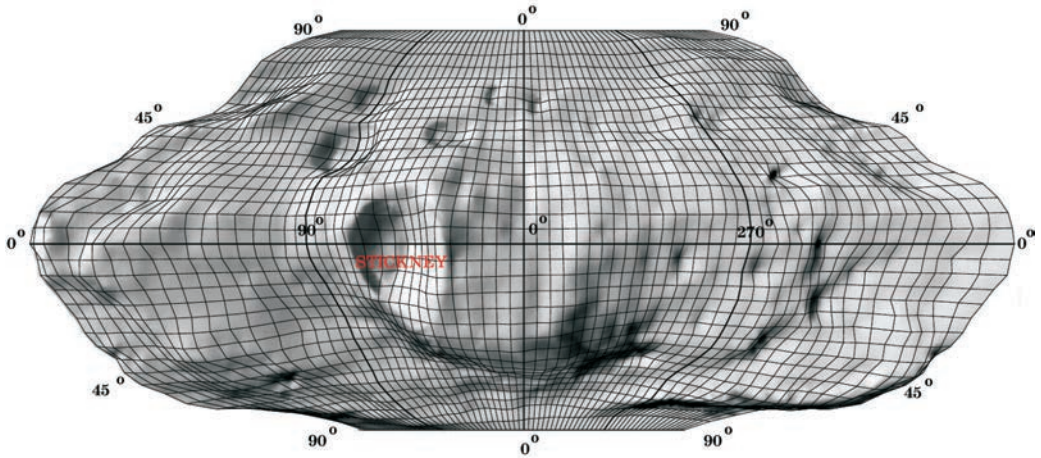
Fig. 23. Cartographic grid of the Eros asteroid in equidistant cylindrical projection of a six-axis ellipsoid (M. Nyrtsov et al., 2007)

powierzchnię odniesienia elipsoidę sześcioośiową ($a = 14\,274,9$ m, $b = 7583,6$ m, $c = 6250,2$ m, $a' = 15\,804,3$ m, $b' = 4750,8$ m, $c' = 5839,6$ m).

M. Nyrtsov (2003) zaproponował również wiele innych odwzorowań do kartowania całego obiektu o nieregularnych kształtach, m.in.:

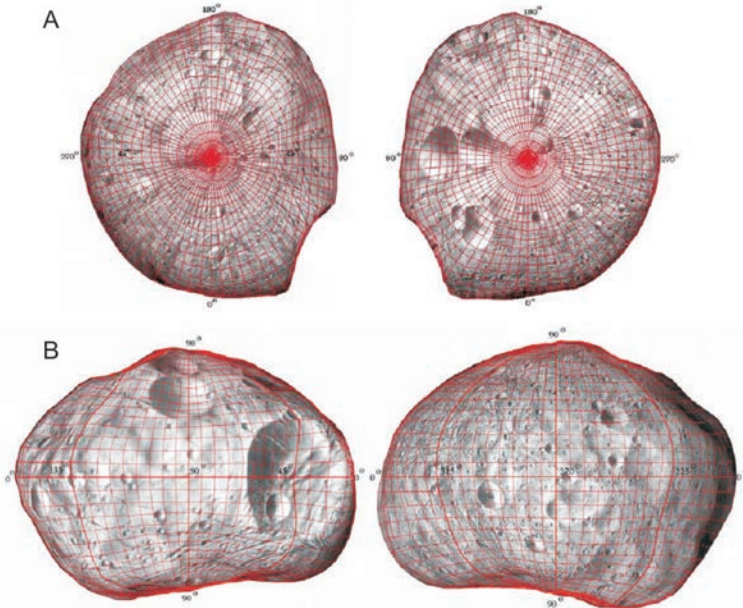
- zmodyfikowane kwadratowe odwzoro-

wanie w przypadku kartowania wschodniej i zachodniej półkuli obiektów nieregularnych oraz przyjmowania różnych południków ograniczających brzeg siatki kartograficznej, kształt przedstawianych obiektów może się znacznie różnić. Do odwzorowania przeciwległych półkul stosuje się południki osiowe 0, 180 oraz 90



Ryc. 24. Siatka kartograficzna Fobosa w odwzorowaniu pseudowalcowym Kawrajskiego (M. Nyrtsov 2001)

Fig. 24. Cartographic grid of Phobos in pseudo cylindrical Kavraysky projection (M. Nyrtsov 2001)



Ryc. 25. Zmodyfikowane odwzorowanie ortograficzne Fobosa (M. Nyrtsov 2003)

Fig. 25. Modified orthographic projection of Phobos (M. Nyrtsov 2003)

i 360. Taki sposób kartowania jest najbardziej odpowiedni dla obiektów niesymetrycznych (ryc. 25B).

Nowe misje kosmiczne pozwolą uzyskać szczegółowe dane dotyczące nieregularnych

obiektów pozaziemskich. Zaistnieje wówczas potrzeba opracowania map wielkoskalowych. Można do nich z powodzeniem stosować wszystkie wymienione wyżej odwzorowania, m.in. ortograficzne, proste walcowe, zmodyfi-

kowane walcowe Bugajewskiego dla elipsoidy trójosiowej oraz odwzorowania morfograficzne.

4. Nowe wyzwania kartografii planetarnej

W wyniku kolejnych misji kosmicznych wiedza o powierzchni planet, ich księżyców oraz innych ciał niebieskich ulega poszerzeniu. Rozwój aparatury sensorycznej oraz dokładności obliczania parametrów orbitalnych sond kosmicznych zwiększa dokładność danych źródłowych. Nowoczesne produkty kartografii planetarnej, jak wirtualne globusy i mapy hipsometryczne, są wykonywane dzięki coraz dokładniejszym numerycznym modelom przestrzennym. Wzrostowi jakości produktów kartografii planetarnej sprzyja również ustanawianie standardów interpretacji i klasyfikacji obiektów topograficznych powierzchni ciał niebieskich. W przypadku opracowań wielkoskalowych i tematycznych, wykonywanych przez różne agencje rządowe, dodatkowym impulsem rozwojowym jest zastosowanie oprogramowania typu GIS, co sprzyja automatyzacji prac i standaryzacji produktów. Rozwiązania GIS-owe ułatwiają także wykonywanie map przeznaczonych do popularyzacji wiedzy. Mapy takie mogą być obecnie wykonywane przez specjalistów z innych dziedzin niż kartografia. Wraz z wymienionymi korzyściami pojawiają się również nowe wyzwania.

Jeden z problemów kartografii planetarnej jest konsekwencją przechowywania map planet w różnych miejscach i przez różne instytucje. Część tych opracowań jest trudna do odszukania z powodu braku odpowiednich metainformacji o ich istnieniu i treści. Przykładem są niektóre mapy geologiczne i geomorfologiczne wykonane przez zespoły fachowców i opublikowane w czasopismach naukowych. Opracowania te stanowią cenny zasób, ponieważ przeszły pomyślnie recenzje naukowe, ale nie są one udostępnione poza daną publikacją. Problem ten w mniejszym stopniu dotyczy opracowań specjalistycznych wykonywanych pod patronatem agencji rządowych, np. map geologicznych planet wykonywanych przez NASA i USGS, gdyż są one wykonywane według ustalonych standardów i gromadzone we wspólnych repozytoriach. Jednakże inne agencje, w szczególności podlegające innym państwom, mogą pracować według odmiennych standardów i posiadać własne repozytoria.

Gromadzenie map geologicznych i geomorfologicznych w różnych agencjach oraz różnorodność standardów ich wykonania wywołują potrzebę zbudowania wspólnej platformy technicznej zapewniającej jednorodność tych opracowań oraz ułatwiająca do nich dostęp. Konieczne zatem staje się utworzenie centralnego repozytorium danych (Central Data Repository). Opracowania zasilające to repozytorium powinny zostać opatrzone odpowiednimi metadanymi, zgodnymi z Planetary Data System (PDS), ułatwiając ich wyszukiwanie. A. Nass i S. Gasselt (2013) proponują trzyetapowy proces zasilania repozytorium: mapami już opublikowanymi, m.in. w ramach ukończonych programów kartograficznych USGS, NASA, mapami indywidualnie publikowanymi w czasopismach naukowych (wymagana jest kontrola poprawności kartograficznej) oraz mapami wykonanymi przez instytucje inne niż amerykańskie, szczególnie przez instytucje badawcze i wyższe uczelnie.

Podobny problem dotyczy opracowań popularyzujących wiedzę. Mapy wykonane w języku innym niż angielski mogą mieć większe grono odbiorców, jeśli będą gromadzone w jednym repozytorium i dostępne online. Międzynarodowa baza danych kartografii planetarnej – International Planetary Cartography Database (IPCD) jest zbiorem nowych i dawnych opracowań kartograficznych (map i globusów), klasyfikowanych według języka opracowania i ciała niebieskiego, którego dotyczy dany produkt. Baza utrzymywana jest przez Komisję Kartografii Planetarnej Międzynarodowej Asocjacji Kartograficznej oraz przez Cosmic Materials Space Research Group Uniwersytetu Loranda Eötvösa w Budapeszcie. Baza daje możliwość odnalezienia opracowania we wskazanym języku, co jest oczywistą zaletą dla odbiorców nieanglojęzycznych. Jednocześnie mapy wykonane w Europie (i nie tylko) mogą zyskać większą popularność wśród mieszkańców krajów anglosaskich. Baza może też stanowić źródło opracowań dla wydawców prywatnych oraz instytucji kartograficznych. IPCD funkcjonuje jako wirtualny katalog oraz biblioteka map i globusów. Jest ona udostępniona pod adresem <http://planetologia.elte.hu/ipcd/>. Opracowania kartograficzne są gromadzone m.in. ze źródeł komercyjnych, prezentacji na konferencjach naukowych, czasopism naukowych, posterów (H. Hargitai, M. Gede 2009).

Narzędzia typu GIS doprowadziły obecnie do rozwoju tzw. neokartografii. Wiele osób, w tym ekspertów dziedzin innych niż kartografia, ma możliwość opracowywania map i innych produktów kartograficznych pomimo braku specjalistycznej wiedzy kartograficznej. Powoduje to przyrost liczby opracowań wartościowych merytorycznie, ale o różnych standardach wykonania. Ujednolicenie sposobu wykonania różnego typu produktów kartograficznych może się odbyć poprzez wprowadzenie standaryzacji symboliki mapowej. Podejmowane są obecnie prace nad wprowadzeniem odpowiednich bibliotek symboli dla map geologicznych i geomorfologicznych. Na podstawie Digital Cartographic Standard for Geologic Map Symbolization rozwijanego przez Służbę Geologiczną USA w imieniu Federal Geographic Data Committee (FGDC) został opracowany zestaw zestandaryzowanych symboli kartograficznych dla map planetarnych. Symbolika FGDC posłużyła za standard do wykonywania opracowań w GIS, przedstawia bowiem zasady wizualizacji kartograficznej geologicznych i geomorfologicznych szczegółów terenowych, zarówno dla opracowań ziemskich jak i pozaziemskich, definiując przy tym katalog symboli punktowych, liniowych i powierzchniowych. Zestaw symboli powinien być wykorzystywany niezależnie od używanego oprogramowania GIS. W tym celu może być zastosowany otwarty format wektorowy SVG oparty na języku XML, rozwijany przez World Wide Web Consortium (A. Nass i inni 2011).

Coraz dokładniejsze dane źródłowe pozwalają na wykonywanie opracowań w większych skalach. Większa skala oznacza wzrost liczby arkuszy, co powoduje potrzebę automatyzacji procesów redakcji kartograficznej i technologii wydania map. Dobrym przykładem sprostania tym potrzebom jest kartograficzny pakiet aplikacyjny Planetary Image Mapper (PIMap) wykonany w Politechnice Berlińskiej. Pierwotnie program wykonano celem realizacji projektu wielkoskalowego mapowania Marsa – *Topographic Image Map Mars 1:200 000*. Aplikacja może jednak zostać wykorzystana również w przypadku innych map otrzymywanych z ortobrazów przy uzupełnieniu danymi topograficznymi, nazwami obiektów topograficznych i poziomiami. Pakiet zapewnia dużą elastyczność jeśli chodzi o możliwości wyboru powierzchni odniesienia, odwzorowań, wydruku i skali. PIMap pozwala na uzyskiwanie różnych

map topograficznych oraz ich serii dla różnych ciał niebieskich (S. Gehrke i inni 2005).

Wiele problemów współczesnej kartografii planetarnej, związanych z wysokim zróżnicowaniem form prezentacji kartograficznej, różnorodnością skal, odwzorowań kartograficznych i stosowanej symboliki może zostać potencjalnie rozwiązane poprzez badania mające na celu wskazanie formalnych ontologii¹ mapowych dla kartografii tematycznej planet. Ontologie tego typu pozwoliłyby na wsparcie kontroli jakości w środowisku naukowym, gdzie coraz częściej autorami map są specjaliści innych dziedzin niż kartografia (S. Gasselt, A. Nass 2013).

Według K. Shingarevej, I. Karachevtsevej i E. Cherepanovej (2007) obecną fazę rozwoju kartografii planetarnej można scharakteryzować w następujący sposób:

1) Rozwój kartografii planetarnej jest ograniczony możliwościami technicznymi i finansowymi. Produkty kartograficzne bywają schematyczne i fragmentaryczne. Brakuje map dla niektórych obiektów pozaziemskich.

2) Dane pierwotne są przetwarzane przez wąską grupę specjalistów (głównie przez ekspertów z USA, Rosji i Unii Europejskiej).

3) Brak jest wypracowanych i zaakceptowanych międzynarodowych standardów w kartografii planetarnej. Dotyczy to m.in. kwestii podziału map na arkusze, systemu znaków kartograficznych, metadanych, sposobu modelowania terenu itp.

4) Potrzebna jest wzmożona popularyzacja produktów kartografii planetarnej w Internecie.

5) Praktycznie nie ma obecnie w szkołach i wyższych uczelniach przedmiotów z zakresu geografii planet.

5. Podsumowanie

Eksplokacja kosmosu jest procesem kumulatywnym. Wzrost ilości oraz dokładności danych źródłowych o obiektach pozaziemskich jest wynikiem stosowania coraz dokładniejszej aparatury pomiarowej, wykorzystywanej w no-

¹ Ontologia – w zastosowaniach informatycznych to formalna i precyzyjna specyfikacja konceptualizacji dotyczącej danej dziedziny wiedzy. Ontologia dostarcza zestawu terminów służących modelowaniu danej dziedziny (typy obiektów, właściwości i współzależności tych obiektów) (T. Gruber 1993).

wych misjach kosmicznych. Rośnie także zbiór opracowań z zakresu kartografii planetarnej. Kartografia planetarna odgrywa jedną z kluczowych ról w popularyzacji wiedzy na temat pozaziemskiej „kosmografii”, wspomaga również procesy badawcze, szczególnie w połączeniu z rozwiązaniami GIS-owymi.

Istnieje szereg uwarunkowań merytorycznych, których rezultatem jest bogactwo opracowań kartografii planetarnej. Każde ciało niebieskie ma swoje indywidualne cechy związane z ukształtowaniem i strukturą powierzchni. Czynniki te muszą zostać wzięte pod uwagę w procesie wizualizacji kartograficznej. Obecnie popularność zyskują opracowania interaktywne, takie jak wirtualne globusy – ze względu na ich walory edukacyjne. Wśród opracowań specjalistycznych, dzięki wzrostowi dokładności danych źródłowych, obserwuje się przyrost liczby opracowań średnio- i wielkoskalowych, które są przygotowywane w coraz bardziej zautomatyzowany i zestandaryzowany sposób.

Jednym z wyzwań współczesnej kartografii planetarnej jest mapowanie ciał małych o nieregularnej powierzchni. Dla takich ciał elipsoida obrotowa nie może być przyjęta jako powierzchnia odniesienia i zamiast niej stosuje się bardziej skomplikowane powierzchnie – elipsoidy cztero- i sześciosiowe. Klasyczne odwzorowania kartograficzne są nieodpowiednie do odwzorowywania takich powierzchni. Alternatywę stanowią odwzorowania klasyczne zmodyfikowane z wykorzystaniem DEM – odwzorowania morfograficzne.

Kartografia planetarna stanowi ważne ogniwo w upowszechnianiu wiedzy o obiektach Układu Słonecznego. Konieczne jest podjęcie wysiłków mających na celu standaryzację różnych opracowań, szczególnie specjalistycznych oraz zasilenie ich odpowiednimi metadanymi. Szeroki dostęp do produktów kartografii planetarnej można zapewnić poprzez budowę scentralizowanych repozytoriów pozwalających na wyszukiwanie odpowiednich opracowań.

Literatura

- Berthoud M.G., 2005, *An equal-area map projection for irregular objects*. „Icarus” Vol. 175, no. 2, s. 382–389.
- Cherepanova E., Karachevtseva I., Leonenko S., 2005, *GIS “The Solar System Planets” case study of the ArcGIS Planet Data Model*. W: „Proceedings of XXII International Cartographic Conference”, Spain, La Coruna, CD-ROM.
- Gasselt S., Nass A., 2013, *Planetary geologic mapping: Initial thoughts on an ontology framework*. W: „Proceedings of Sharing Knowledge Symposium”, <http://planetcarto.files.wordpress.com/2012/04/05gasselt-nass.pdf>.
- Gehrke S., Wählich M., Lehmann H., Albertz J., Rotsch T., 2005, *Generation of digital topographic maps of planetary bodies*. „Int. Arch. Photogram. Rem. Sens. Spatial Inform. Sci.”, http://www.redaktion.tu-berlin.de/fileadmin/fg227/Publications/0609_ISPRS_Goa_Planetary_Bodies.pdf.
- Grishakina E., Lazarev E., Lazareva M., 2013, *Cartographical aspects of Martian moons modelling*. W: „Proceedings of XXVI International Cartographic Conference”, Dresden, http://icaci.org/files/documents/ICC_proceedings/ICC2013.
- Gruber T.R., 1993, *A translation approach to portable ontology specifications* “Knowledge Acquisition” Vol. 5, no. 2, s. 199–220.
- Hargitai H., 2006, *Planetary maps: Visualisation and nomenclature*. „Cartographica” Vol. 41, no. 2, s. 150–164.
- Hargitai H., Gede M., 2009, *Three virtual globes of Mars: topographic, albedo and a historic globe*. W: „European Planetary Science Congress Abstracts” Vol. 4, EPSC2009-47, <http://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2009/EPSC2009-47.pdf>.
- Kirk R., Rosiek M., Howington-Kraus E., Eliason E., Archinal B., Mae Lee E., 2001, *Planetary geodesy and cartography at the USGS, Flagstaff: Moon, Mars, Venus and beyond*. W: „Proceedings of XX International Cartographic Conference”, Beijing, <http://planetcarto.wordpress.com/meetings/2001-beijing-china/>.
- Lorenz R.D. 2013, *A global topographic map of Titan*. „Icarus” Vol. 225, no. 1, s. 367– 377.
- Nass A., van Gasselt S., 2013, *Archiving and public dissemination of planetary geologic and geomorphologic maps*. W: „Proceeding of Sharing Knowledge Symposium”, <http://lazarus.elte.hu/jointssymposium2013/docs/proceedings.pdf>.
- Nass A., van Gasselt S., Jaumann R., Asche H., 2011, *Requirements for planetary symbology in GIS*. „Advances in Cartography and GIScience” Vol. 2, s. 251– 266.
- Nyrtsov M., 2001, *The problems of mapping irregularly-shaped celestial bodies*. W: „Proceedings of XX International Cartographic Conference”, Beijing, <http://planetcarto.wordpress.com/meetings/2001-beijing-china>.
- Nyrtsov M., 2003, *The classification of projections of irregularly-shaped celestial bodies*. W: „Proce-

- edings of XXI International Cartographic Conference”, Durban, http://www.cartesia.org/geodoc/icc2005/pdf/poster/TEMA23/Nyrtsov%20Maxim%20V._Russia.pdf.
- Nyrtsov M., Bugaevsky L.M., Stooke P., 2007, *The multiple axis ellipsoids as reference surfaces for mapping of small celestial bodies*. W: „Proceedings of XXIII International Cartographic Conference”, Moscow, http://icaci.org/files/documents/ICC_proceedings/ICC2007/html/Proceedings.htm.
- Shingareva K.B., Karachevtseva I.P., Chrepanova E.V., 2007, *Extraterrestrial mapping. Analyses and perspectives*. W: „Proceedings of XXIII International Cartographic Conference”, Moscow, http://icaci.org/files/documents/ICC_proceedings/ICC2007/html/Proceedings.htm.
- Stooke P., *Large-scale asteroid maps*. „Lunar and Planetary Science”, http://webapp1.dlib.indiana.edu/virtual_disk_library/index.cgi/1185879/FID904/ABSTRACTS/1-500/1021.pdf.
- Wahlisch M., Stooke P.J., Karachevtseva I.P., Kirk R., Oberst J., Willner K., Nadejdina I.A., Zubarev A.E., Konopikhin A.A., Shingareva K.B., 2013, *Phobos and Deimos cartography*. „Planetary and Space Science”, <http://dx.doi.org/10.1016/j.pss.2013.05.012>.
- Willner K., Oberst J., Hussmann H., Giese B., Hoffmann H., Matz K.-D., Roatsch T., Duxbury T., 2009, *Phobos control point network, rotation, and shape*. „Earth and Planetary Science Letters” Vol. 294, no. 3–4, s. 541–546, DOI: 10.1016/j.epsl.2009.07.033.

Źródła internetowe

- http://planetcarto.files.wordpress.com/2013/05/titan_map_topo.jpg
<http://159.226.88.30:8080/CE2release/cesMain.jsp>
<http://planetologia.elte.hu/vrml>
<http://terkeptar.elte.hu/vgm/2/?show=globe&id=111&descid=219>
<http://cartsrv.mexlab.ru/geo/imagetest.swf>
http://planetcarto.files.wordpress.com/2013/08/miigaik_mexlab_map.jpg
<http://planetologia.elte.hu>
<http://nssdc.gsfc.nasa.gov>
<http://marsprogram.jpl.nasa.gov>
<http://photojournal.jpl.nasa.gov>
http://sbn.psi.edu/pds/asteroid/EAR_A_3_RDR_STOOKEMAPS_V1_0/maps
<http://planetologia.elte.hu/ipcd>

Streszczenie

Najpopularniejszymi opracowaniami kartografii planetarnej służącymi upowszechnianiu wiedzy i celom edukacyjnym są globusy (coraz częściej wirtualne), mapy hipsometryczne i cieniowane wykonywane na podstawie numerycznego modelu terenu (NMT) oraz fotomozaiki. Do często spotykanych opracowań specjalistycznych należą wieloarkuszowe mapy geologiczne i geomorfologiczne. W celu poprawnego ilustrowania rzeźby terenu często stosowana jest kolorystyka odzwierciedlająca naturalne barwy danej planety. Nazwy obiektów topograficznych są z reguły podane po łacinie (według ustaleń Międzynarodowej Unii Astronomicznej) oraz w języku narodowym użytkownika. Szczególnie atrakcyjne są globusy wirtualne oraz mapy interaktywne dostępne przez Internet.

Jednym z podstawowych problemów kartografii planetarnej jest znalezienie sposobu dokładnego odwzorowania na płaszczyźnie nieregularnych powierzchni ciał niebieskich. Niektóre duże planety mają dość regularny kształt, w związku z czym jako powierzchnie odniesienia stosuje się elipsoidy obrotowe lub trójosiowe oraz powszechnie znane odwzorowania kartograficzne. W przypadku małych obiektów, o bardzo nieregularnych kształtach, takich jak np. księżycy Fobos i Deimos, stosowanie konwencjonalnych rozwiązań jest niewystarczające.

Przyjmuje się wówczas jako powierzchnie odniesienia elipsoidy cztero-, pięcio- lub sześciosiowe oraz ich odwzorowania na płaszczyznę. Interesującym rozwiązaniem są także tzw. odwzorowania morfograficzne, których formuły odwzorowawcze są funkcjami trzech parametrów, tzn. szerokości i długości planetocentrycznej oraz zmiennej promienia.

Wzrostowi jakości produktów kartografii planetarnej sprzyja obecnie gromadzenie coraz dokładniejszych danych źródłowych oraz wprowadzanie standardów interpretacji i klasyfikacji obiektów topograficznych ciał niebieskich. Zastosowanie oprogramowania typu GIS wspomaga proces automatyzacji wykonywania i standaryzacji opracowań specjalistycznych.

Istnieje potrzeba tworzenia wspólnych i scentralizowanych repozytoriów opracowań kartograficznych, zasilanych odpowiednimi metadanymi, w celu ułatwienia dostępu do tych produktów zarówno zwykłym jak i specjalistycznym użytkownikom. W przypadku opracowań specjalistycznych ujednolicenia wymagają standardy wykonywania, podziału na arkusze oraz systemu znaków kartograficznych. Konieczność wspierania kontroli jakości kartograficznej jest w dużej mierze konsekwencją rozwoju technologii GIS-owych, dzięki którym coraz częściej autorami map są specjaliści innych dziedzin niż kartografia.

PAWEŁ PĘDZICH, KAMIL LATUSZEK

Department of Cartography of the Warsaw University of Technology

ppedzich@gik.pw.edu.pl

kamil.latuszek@wp.pl

Planetary cartography – sample publications, cartographic projections, new challenges

Abstract. This is the second article explaining the issues related to planetary cartography. It presents samples of cartographic publications developed around the world, such as photo-mosaics, albedo maps, topographic maps, globes (including virtual ones) and GIS studies of various celestial bodies such as the Moon, planets, their moons and asteroids. Moreover, the authors characterise the cartographic projections used for celestial bodies, focusing in particular on the problems connected with drawing up maps of irregular objects, whose shape is significantly different from the typical sphere or ellipsoid. Finally, the authors discuss new challenges faced by planetary cartography, resulting from the development of the techniques of data collection, analysis and presentation, the growing amount of collected data and the increasing interest in cartographic publications related to this issue.

Keywords: maps of planets, maps of moons, maps of asteroids, cartographic representation of celestial bodies

1. Introduction

The night sky full of stars has always evoked human interest and has been the subject of our studies. Observed stars were catalogued, their location on the firmament was measured and maps were elaborated. First maps of the sky had the form of petroglyphs. As science developed, star observation methods were improved and increasingly accurate maps were created, containing a growing number of objects. The subject of the first astronomic observations and mapping was the Moon. One of the objectives of the first space missions was to develop accurate maps of Earth's natural satellite. This curiosity and will to broaden our knowledge about the Universe resulted in numerous missions whose aim was to study the planets, asteroids and comets in our Solar System. The objectives of the research missions were varied, including, first of all, learning about the relief, geological structure, chemical

composition, but also exploring the possibility of the existence of life forms on other planets and the identification of potential threats, such as predicting asteroid collisions with the Earth. Maps play an important role in such research, as they provide us with the possibility to interpret objects and phenomena, to determine their exact location etc. The constant increase in the amount of obtained data led to a growing demand for cartographic publications of this kind.

Various types of maps can be distinguished among cartographic representations of celestial bodies, including: albedo maps, topographic, geomorphological, geological, hypsometric, tectonic maps, as well as atlases and globes (including virtual ones). GIS technologies are increasingly used for the preparation of this kind of publications. Celestial bodies in the Solar System differ from each other in terms of geology, terrain relief and the accuracy and type of source data, which results in a rich variety of cartographic products that differ depending on the mapped object and the purpose of the map. The division between specialist maps and those promoting knowledge is quite clear. Specialist maps include mainly thematic geomorphological or geological maps, etc., but also topographic maps in larger scales, divided into individual sheets, while interactive, small-scale representations are used for educational and popularisation purposes, currently mainly in form of virtual globes.

Maps of extra-terrestrial objects require the application of various cartographic projections. Representations of objects of clearly irregular shapes cause the most difficulties for cartographers. The application of standard cartographic projections is sometimes insufficient when the aim is to achieve a high accuracy of surface visualization. This is why the problem of selecting adequate cartographic projections is often

discussed in studies related to planetary cartography.

We are currently facing the need to introduce wide-scale standardisation in terms of the interpretation and classification of topographic objects and methods of cartographic presentation, including the standardization of the system of cartographic symbols in specialist maps. The introduction of centralised repositories supported by an adequate meta-informational structure will, on the other hand, facilitate and improve the access to planetary cartography products both for laymen and expert users. Pursuant to international treaties, knowledge about extra-terrestrial objects has to be generally available and planetary cartography may play a vital role in this process.

2. Sample publications in planetary cartography

A set of global, monochromatic mosaics of the surface of Mercury, published by the NASA Planetary Data System (PDS) allowed for the preparation of a base image for a global photomosaic of Mercury (fig. 1). Polar regions were presented with use of stereographic projections (boundary latitudes: 65°S, 65°N). The area of the whole planet has been represented in conformal cylindrical projection. The maximum resolution of the map is 250 m/pixel.

Figure 2 presents a small-scale map of the topography of Venus. Topographic data collected in the course of the Magellan mission were presented with use of the Robinson projection. Names of topographic objects are available in two language versions: Hungarian and Latin. The publication was prepared by H. Hargitai (Eötvös Loránd University in Budapest, Institute of Geography and Earth Sciences).

The Central European edition of the multilingual map of the Moon (fig. 3) presents the visible and dark side of the Moon at the scale 1:12,800,000 with use of Lambert azimuthal transverse projection. The terrain relief is presented with use of shading. Names of topographic objects are given in Latin, although for the largest lunar “seas” translations into five other languages (English, Czech, Polish, Croatian and Bulgarian) are provided. Geophysical information about the Moon is presented on the reverse side of the map (in all these languages).

Figure 4 shows a part of the visible side of the Moon, situated between the Moon equator, Sea of Rains and Sea of Serenity. The upper part of the illustration shows an enlarged traditional map discussed in the previous paragraph, while the lower part shows the image presented on a virtual map. The virtual map is based on data collected by the American space probe Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO). The virtual map was presented with use of the transverse orthographic projection, which results in some differences in the shapes and relative positions of topographic objects.

Examples of hypsometric maps of celestial bodies are maps prepared by E. Grishakina, E. Lazarev, and M. Lazareva. Hypsometric maps of the moons of Mars at the scale 1:60,000 are prepared with use of orthographic projections of both hemispheres (fig. 5). The colour scheme of the hypsometric map reflects the natural colours of these satellites and the colours change with every 500 m. Latin and Russian names of terrain formations are provided (E. Grishakina et al., 2013).

An international team of ten institutions, supervised by Ralph D. Lorenz from the John Hopkins University designed the first topographic map of Titan presenting the whole object (fig. 6). Radar data from the Cassini probe (RADAR SARTopo), together with altimetric data were used as a source. 90% of the map is a result of interpolation of these data (R.D. Lorenz 2013).

During the 26th International Cartographic Conference in Dresden, in 2013 (<http://www.icc2013.org/>) the Chinese cartographer Lingli Mu presented global-range interactive maps basing on data collected by the space ship Chang'E-2: a photomosaic and hypsometric map of the Moon. The interactive map is available free of charge online, at: <http://159.226.88.30:8080/CE2release/cesMain.jsp>.

Figure 7 presents an example of a large-scale topographic map of Mars prepared within the NASA geological mapping programme. The presented contour maps are a result of DEM processing for two adjacent sheets at the scale 1:500,000. Contour lines are based on a stereo analysis of the images from Viking Orbiter, a resolution of 200–250 m/pixel and altitude accuracy of 80–160 m. Part of the left-side map, where poor coverage was obtained, was prepared with use of high-resolution DEM con-

ducted with use of photoclinometric methods. The base image was the global mosaic MDIM 2.0 (K. Kirk et al., 2001).

Figure 8 presents global-range mosaic images of Jupiter moons: Ganymede, Europa and Callisto. The maps, created with use of stereographic projection in normal position and in the Mercator projection are designed for printing at the 1:15,000,000 scale. The colour scheme of the Ganymede mosaic resembles the natural colours and it was prepared basing on 3-band remote sensing data from the Galileo mission and 2-band data from the Voyager mission, with single-band coverage in polar areas. The mosaics of Europa and Callisto are based on single-band data (K. Kirk et al., 2001).

An example of a globe of an extra-terrestrial object is the globe of the volcanic moon Io prepared by the members of the Commission on Planetary Cartography of the International Cartographic Association, displayed in the hall dedicated to the Solar System of the volcano museum in Celldomok, Hungary. The hand-crafted globe has a diameter of 50 cm. It is covered with photo mosaic and names of major superficial structures.

Examples of commercially produced globes are globes of Mars, of a diameter of 30.5 cm, prepared by the US Geological Survey. The globe presented on the left side of Figure 9 was prepared basing on a digital mosaic of a resolution of 1 km/pixel (Viking Orbiter), integrated with MDIM (Global Digital Image Mosaic of Mars) data of a resolution of 231 m/pixel. The globe focuses mainly on topographic details of the planet. The globe on the right was created with use of a color-coded shaded relief map derived from a DTM developed from the measurements of the probe Mars Global Surveyor (MOLA camera) (K. Kirk et al., 2001).

An interesting example of virtual publications in planetary cartography is the set of three globes of Mars: historic, topographic and albedo, which presents the intensity of light reflected from the surface (fig. 10). Virtual globes are a continuation and extension of the series: "Multilingual Maps of Terrestrial Planets and their Moons", co-ordinated by the Commission on Planetary Cartography of the International Cartographic Association. Their aim is to popularise knowledge about the planet. Thus, Latin nomenclature (international, established by the IAU) is accompanied by informal Eng-

lish names (not officially approved although often used in scientific publications). Moreover, relevant marginal notes have been introduced. The historical globe represents the albedo presented on a black-and-white, hand-drawn Hungarian map created in 1878 which, in turn, was based on a 2 years earlier map by C. Flammarion. The topographic globe has been created basing on topographic data obtained with use of the MOLA camera installed on board of the Mars Global Surveyor probe. Contrary to the NASA and USGS maps, the authors decided not to use blue and green colours in the colour scheme representing the heights, as a typical user might associate such colours with water reservoirs and vegetation. The colours: white, yellow, orange and brown, which better reflect the natural colours of the planet, were used instead. The virtual albedo globe in shades of brown (photo mosaic) was prepared basing on the data from the Mars Orbiter Camera installed on board of Mars Global Surveyor probe (panchromatic images of 1999). The globes have wide interactive functionalities: users may turn them, bookmark viewing points, zoom in and out from the surface. It is also possible to download a relevant .jpg file as a basis to create an actual physical globe. An atlas of pre-defined orthographic views of the planet is also being prepared (H. Hargitai, M. Gede 2009).

Another example of a virtual globe is the virtual globe of Io covered with photomosaic (fig. 11) in the collections of the Virtual Globes Museum (maintained by the Faculty of Cartography and Geo Information Technology at the Eötvös Lorand University in Budapest). The nomenclature is designed for the scale of 1:100,000,000. The size of printout equals a diameter of 13 cm. The virtual globe may be downloaded online as an overlay for the Google Earth software.

An example of an interactive GIS system designed for celestial bodies is the system prepared for Phobos (fig. 12), presented during the 26th International Cartographic Conference in Dresden, in 2013, by Irina Karachevskaya, the Head of the MexLab at the Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK). The system interface is available online at: <http://carsrv.mexlab.ru/geo/imagetest.swf>.

The Moscow State University of Geodesy and Cartography is also conducting works on

a GIS named “Solar System Planets”. In the future, this type of system may enable us not only to chart planet surfaces but it will also facilitate data collection, management and analysis (e.g. the selection of landing sites for space missions or processing of remote sensing data). As a result of these works, a Planetary Data Model (PDM) was created that enables to integrate spatial data originating from various sources. The data will be stored in a central database in a format that will allow for them to be used by numerous research groups (E. Che-repanova et al., 2005).

3. Cartographic projections used for maps of celestial objects

Both traditional and innovative cartographic projections are used for the development of maps of planets or celestial bodies such as planet moons or asteroids. The shapes of some of the represented objects, such as Mars, are similar to spheres or ellipsoids, so they may be mapped with use of the same cartographic projections as are used for the representation of Earth’s surface (fig. 13).

However, there are numerous irregularly shaped objects that are significantly different from an ellipsoid or a sphere (such as the moons of Mars – Phobos and Deimos); in these cases the application of conventional solutions proves quite useless.

Before the application of a cartographic projection it is necessary to define the mathematical surface of reference and the set of coordinates on that surface.

In the case of such extra-terrestrial objects as the Moon or Mars, whose shape resembles an ellipsoid, their surfaces of reference have been determined quite accurately. For objects with rocky surfaces the ellipsoid is defined by the rotation axes and mean surface diameter, without the atmosphere. The shape of Mars (fig. 14) resembles an egg, whose southern and northern radii differ by approximately 6 km. However, this difference is so small that the mean polar-oriented radius is used as a basis for defining the ellipsoid. The Moon is practically spherical. In the case of gas planets such as Jupiter, the surface of constant pressure of one bar is considered as the surface of the ellipsoid. Small moons, asteroids and comets are often shaped irregularly. For some of them,

such as Io – one of Jupiter’s moons – a tri-axial ellipsoid is considered as the best approximation of the surface.

For very irregular objects the concept of using an ellipsoid as the surface of reference is pointless. Such surfaces are commonly defined by a set of objects located on the surface. To do so, planetocentric coordinates of such points and their distance from the centre of the object are determined, while projections of spheres may be used for the preparation of maps, although a different radius is selected for each point. However, even such approach may be inadequate for non-convex surfaces such as Eros (fig. 15), where the longitude and latitude may not always unambiguously define a specific single location on the surface.

The selection of the surface of reference is essential for the accurate representation of irregularly shaped extra-terrestrial objects on a plane. Elongated, tri-axial, four-, five- and even six-axis ellipsoids are used. The possibilities of the application of four-axis and six-axis ellipsoid for charting the surfaces of irregular objects were presented, among others, by M. Nyrtsov, L. Bugaevsky and P. Strooke (2007).

The construction of a four-axis or six-axis ellipsoid is quite simple. Different lengths of semi-axes at four perpendicular directions are defined. Figure 16 shows a six-axis ellipsoid with semi-axes marked as a, a', b, b', c, c' . A set of coordinates is marked on the surface of reference. The most commonly used are planetocentric or planetographic coordinates, defined analogically to geocentric and geographic coordinates (fig. 17).

The meridian of origin is selected as that of a clearly visible, permanent object on the surface. If no such permanent object exists, the meridian of origin is selected basing on mathematical principles.

The parameters of the ellipsoid are determined basing on a grid of control points that may be identified unambiguously in photographs of the object. K. Willner et al. (2009) determined a grid of points for Phobos basing on Super Resolution Channel (SRC) imaging data obtained from the Mars Express (MEX) probe. The points were located in craters on the surface of the satellite. A surface model and the dynamic and physical parameters of a tri-axial ellipsoid were determined with use of the grid of points.

In the case of surfaces of planets that resemble spheres or ellipsoids such objects are mapped with use of a series of various cartographic projections that are selected similarly as in the case of Earth's surface. In the case of irregular surfaces the approach to the problem of their representation on a plane is slightly different.

The problem of the development of projections for irregular extra-terrestrial objects has emerged quite recently. Two moons of Mars, namely Phobos and Deimos (fig. 18), objects characterised by extremely irregular shapes, are particularly popular among cartographers.

The first maps of Phobos and Deimos, but also of other extra-terrestrial objects, were prepared with use of traditional cartographic projections that used a sphere as the surface of reference, so they did not take into account the irregular shape of such objects. In 1974, T. Duxbury used the Mercator projection for the preparation of maps of Phobos and the stereographic projection according to NASA approved standard for global mapping of Mars and its moons for the polar regions. In 1979, P. Thomas prepared a detailed map of Phobos and Deimos basing on data from the Viking probe. In 1985, J. Snyder developed an accurate conformal cylindrical projection for a tri-axial ellipsoid approximating the shape of Phobos. J. Snyder did not base his formulae on planetocentric coordinates, which resulted in the fact that these projections are difficult to use in practice for generally available sets of data (M. Wahlisch et al., 2013).

P. Stooke was the first one to show the irregular shape of satellites of Mars on his maps. He modified the traditional azimuthal projection enabling the radius in representation functions to change from one point to another throughout the map. He determined the local radius for each location basing on surface model. This method may be applied to any surface, including a tri-axial ellipsoid. Heights are obtained from a digital surface model. Due to the fact that this projection was designed to illustrate the precise shape of the object, it is called a morphographic projection (fig. 19) (M. Wahlisch et al., 2013).

Soviet and Russian maps of Phobos and Deimos were created at the MIIGAIK during the preparations for Phobos-1 and Phobos-2 missions. Two new projections of tri-axial ellip-

loid were used: conformal cylindrical projection for equatorial regions and medium latitudes and azimuthal equidistant projection along meridians for polar areas. The first one, called the modified Bugayevsky projection, allows for the representation of the actual shape of the irregular surface of the object (fig. 20). This projection is similar to Mercator projection: the distances between meridians and parallels change like the respective distances on the ellipsoid (M. Wahlisch et al., 2013).

M. Berthoud (2005) was one of the first cartographers who developed maps of the surface of Eros and Cleopatra asteroids in equal-area projection taking into account their irregular shape. He used an original method consisting in dividing the surface of the object into small quadrangles (along the grid of coordinates) and then projecting them on a plane while maintaining the surface area. Map developed with use of this method presents an image of the object at the same time maintaining the approximate shape of the lines delimiting the map. Although this method enabled to obtain a quite accurate representation of the surface of objects, such maps may discourage potential users due to the irregular shape of the cartographic grid.

M. Nyrtsov (2003) attempted to classify the projections used for irregular extra-terrestrial objects in his work. These projections may be classified as follows:

- projections classified according to the shape of the object,
- projections classified according to the size of the represented area,

According to the first criterion projections may be further classified into:

- representations of objects whose shape significantly differs from that of a sphere, rotational ellipsoid, tri-axial ellipsoid – objects of a shape resembling a potato (so-called potato-graphic projections),
- representations of double-shaped objects,
- cartographic representations of objects characterised by a polyhedral shape.

Figure 21 shows an example of “potatographic” projection.

Figure 22 shows a sample cartographic representation of double-shaped objects.

Cartographic representation of objects characterised by a polyhedral shape may be determined in two ways:

– the representation of a double-shaped object may be considered as a representation of simple, connected objects with use of a single projection,

– by means of application of integrated projections such as the Goode projection.

Representations classified according to the size of the represented area may be divided into:

- planetary scale projections,
- hemisphere projections,
- small area projections for large-scale maps (region scale projections).

Planetary scale maps are used for presenting the geological structure, geomorphology or albedo of the object.

Currently the following projections are most commonly used:

- orthographic,
- simple cylindrical projection,
- modified cylindrical Bugayevsky projection for tri-axial ellipsoid,
- class of morphographic projections (azimuthal projections where the constant radius has been replaced by local radii obtained from digital model of the actual surface).

Projections of four- and six-axis ellipsoids are also used to represent the surface more accurately.

P. Stooke from the Victoria University was one of the first scientists to present this type of solution in his doctoral thesis. He prepared the map of Amalthea (satellite of Jupiter) basing on images from the Voyager mission. He used a four-axis ellipsoid with the axes: $a = 105$ km, $a' = 165$ km, $b = 83$ km, $c = 75$ km (where c is the polar axis) as the surface of reference. On the other hand, M. Nyrtsov, L. Bugaevsky, P. Stooke (2007) presented a map of the Eros asteroid in cylindrical equidistant projection (fig. 23) adopting the six-axis ellipsoid ($a = 14,274.9$ m, $b = 7,583.6$ m, $c = 6,250.2$ m, $a' = 15,804.3$ m, $b' = 4,750.8$ m, $c' = 5,839.6$ m) as surface of reference.

M. Nyrtsov (2003) also proposed numerous other projections for mapping whole irregularly shaped objects, including:

- modified equidistant along meridians square cylindrical projection,
- modified iso-cylindrical projection,
- modified Sanson projection,
- modified Kavraysky projection (fig. 24).

For mapping polar areas perspective azimuthal projections are used – orthographic (fig. 25A),

gnomonic and stereographic, along with their modifications proposed by P. Stooke (morphographic projections).

In the case of mapping the eastern and western hemispheres of irregular objects, the shape of the represented objects may differ significantly depending on the meridian adopted as the limit of the cartographic grid. Axial meridians 0, 180 or 90 and 360 are used for the representation of opposite hemispheres. This type of mapping is the most suitable for asymmetrical objects (fig. 25B).

New space missions will enable us to obtain detailed data about irregular extra-terrestrial objects. This will result in the need to develop large-scale maps. All the projections listed above, including orthographic, simple cylindrical, modified cylindrical Bugayevsky for tri-axial ellipsoid and morphographic projections may be successfully used for the preparation of large-scale maps.

4. New challenges faced by planetary cartography

Subsequent space missions broaden our knowledge about the surface of planets, their moons and other celestial bodies. The development of sensor equipment and the accuracy of calculating orbital parameters of space probes improve the accuracy of source data. New planetary cartography products, such as virtual globes and hypsometric maps are created basing on still more accurate digital spatial models. Another factor contributing to the improved quality of planetary cartography products is the establishing of standards for the interpretation and classification of topographic objects on the surface of celestial bodies. In the case of large-scale and thematic maps prepared by various government agencies another development-stimulating factor is the application of GIS-type software, which fosters the automation and standardisation of the created maps. GIS solutions also facilitate the preparation of maps aimed at the popularisation of science. Nowadays, such maps can be prepared by experts specialising in areas other than cartography. However, the listed benefits lead to new challenges.

One of the problems of planetary cartography is a result of the fact that planet maps are stored in various places by different institu-

tions. Some of these documents are hard to find due to the lack of adequate meta-information. Examples are geological and geomorphological maps prepared by research teams and published in academic journals. Such works are valuable resources, as they have successfully passed the process of academic reviews, but they are not available apart from the original publication. This problem applies to specialist studies created under the auspices of governmental bodies, e.g. geological planet maps created by NASA and USGS to a lesser extent, as they are prepared according to established standards and stored in common repositories. However, other agencies, in particular those in other countries, may work pursuant to different standards and have their own repositories.

Storing geological and geomorphological maps in different agencies and the variety of standards for their preparation results in the need to create a common technological platform that would ensure the uniformity of these works and facilitate access to them. Thus, it seems necessary to create a central data repository. Maps submitted to such repository should be marked with adequate metadata in compliance with Planetary Data System (PDS) that would facilitate the search process. A. Nass and S. Gasselt (2013) propose a three-stage process of supplying the repository: 1) with maps already published, including within already completed cartographic programmes of USGS or NASA, 2) maps published individually in academic journals (checking cartographic correctness is required) and 3) maps created by non-American institutions, in particular those created by research centres and academic institutions.

Publications aimed at popularising knowledge are facing a similar problem. Maps created in languages other than English may reach a wider audience if they are stored in a single repository and available online. The International Planetary Cartography Database (IPCD) is a collection of new and historical cartographic works (maps and globes), classified according to language and celestial body that the given product refers to. The base is maintained by the Commission on Planetary Cartography of the International Cartographic Association and the Cosmic Materials Space Research Group of the Lorand Eötvös University in Budapest. It

provides the possibility to search for maps in the selected language, which is an obvious advantage for non-English speaking audiences. At the same time, maps created in Europe (but not only) may become increasingly popular among residents of English-speaking countries. The base may also constitute a source of publications for privately owned publishing houses and cartographic institutions. IPCD acts as a virtual catalogue and library of maps and globes. It is available online at: <http://planetologia.elte.hu/ipcd/>. Cartographic products are obtained, among others, from commercial sources, presentations at scientific conferences, academic journals and posters (H. Hargitai 2009).

GIS-type tools have led to the recent development of so-called neo-cartography. Many people, including experts specializing in areas other than cartography, have the opportunity to create maps and other cartographic products in spite of the lack of cartographic knowledge. This results in an increased number of works that are valuable from the point of view of the content, but are based on different preparation standards. The methods of preparation of different types of cartographic products may be standardised by means of introducing the standardisation of map symbols. Currently, works on the introduction of adequate symbol libraries for geological and geomorphological maps are in progress. Basing on the Digital Cartographic Standard for Geologic Map Symbolization developed by the US Geological Survey on behalf of the Federal Geographic Data Committee (FGDC) a set of standardised cartographic symbols for planetary maps has been developed. The FGDC symbols served as a standard for the preparation of GIS studies as it presents the principles of cartographic visualization of geological and geomorphological terrain details both for terrestrial and extra-terrestrial representations, at the same time defining a catalogue of point, linear and areal symbols. The set of symbols should be applied regardless of the used GIS software. The open vector format SVG, based on XML language and developed by World Wide Web Consortium (W3C) may be used for that purpose (A. Nass et al., 2011).

The increasing accuracy of source data enables to prepare maps in larger scales. Larger scale means an increased number of charts, which leads to the need to automatize carto-

graphic editing process and map publication technology. A good example of satisfying these needs is the cartographic application package Planetary Image Mapper (PIMap) created at the Berlin University of Technology. The software was originally developed for the realisation of large scale mapping of Mars programme – Topographic Image Map Mars 1:200,000. However, the application may also be used for other maps obtained from orthoimages with the support of topographic data, names of topographic objects and contour lines. The package guarantees high flexibility in terms of selection of surface of reference, projections, printout and scale. PIMap enables to create various topographic maps and series of such maps for various celestial bodies (S. Gehrkei et al., 2005).

Many problems faced by contemporary planetary cartography, resulting from high differentiation of cartographic presentation forms, different scales, and cartographic projections and used symbols, may potentially be solved by research aimed at determining formal map ontologies¹ for thematic cartography of planets. This type of ontologies would enable us to support quality control in scientific environment, where maps are still more often created by experts from areas other than cartography (S. Gasselt, A. Nass, 2013).

According to K. Shingareva, I. Karachevtseva, E. Cherepanova (2007) the current phase of development of planetary cartography may be characterised as follows:

1) The development of planetary cartography is limited by technological and financial possibilities. Cartographic products are often schematic and fragmented. There are no maps for certain extra-terrestrial bodies.

2) Source data are processed by a narrow group of specialists (mainly experts from the USA, Russia, and European Union).

3) No developed and approved international standards in planetary cartography exist. This refers to such issues as dividing maps into charts, the system of cartographic symbols, metadata, terrain modelling system etc.

4) It is necessary to improve the dissemination

of planetary cartography products on the Internet.

5) Schools and universities practically do not teach any subjects related to planetary cartography,

5. Conclusion

Exploration of the Universe is a cumulative process. The increase in the amount and accuracy of source data concerning celestial bodies results from the use of increasingly accurate measurement equipment in recent space missions. The collection of studies in planetary cartography is also growing. Planetary cartography plays a vital role in the popularisation of knowledge related to extra-terrestrial “cosmography”. It also supports research processes, in particular in connection with GIS solutions.

There is a series of substantial conditions that result in the rich variety of planetary cartography studies. Each celestial body has its own individual properties connected with the formation and structure of its surface. These factors have to be taken into account in the cartographic visualization process. Interactive studies, such as virtual globes are currently becoming increasingly popular due to their educational value. The improved accuracy of source data resulted in an increase in the number of medium- and large-scale specialist publications that are prepared in an increasingly automated and standardised way.

One of the challenges faced by modern planetary cartography is the mapping of small, irregularly shaped bodies, for which the rotational ellipsoid cannot be adopted as the surface of reference. Instead of this, more complex surfaces are used – four- and six-axis ellipsoids. Classical cartographic projections are unsuitable for the representation of such surfaces. Alternative solutions are morphographic projections, i.e. classical projections modified basing on digital elevation models.

Planetary cartography is a vital element in the dissemination of knowledge about objects in the Solar System. It is necessary to take steps with the aim to standardise various publications, in particular specialist ones and to support them with the relevant metadata. Wide access to planetary cartography products may be ensured by means of creating centralised repositories allowing to search for the required works.

¹ Ontology – in computer sciences – a formal, explicit specification of a conceptualization referring to a given area of knowledge. Ontology provides a common vocabulary to denote the types, properties and interrelationships of concepts in a domain (T. Gruber, 1993).

References – see after the Polish text, pp. 386–387

Summary

The most popular studies in planetary cartography aimed at the dissemination of knowledge and education are globes (virtual ones becoming increasingly popular), hypsometric and shaded maps created basing on DEM and photo mosaics. On the other hand, popular specialist products include multi-chart geological and geomorphological maps. In order to correctly illustrate the terrain relief, a colour scheme reflecting the natural colours of the given planet is often used. Names of topographic objects are usually given in Latin according to the guidelines of the International Astronomic Union and in the local language of the user. Virtual globes and interactive maps available on the Internet are particularly attractive due to their high level of interactivity.

One of the major problems faced by planetary cartography is finding a way that would enable to accurately represent the irregular surfaces of celestial bodies on a plane. Some large planets have a quite regular shape, so rotational or tri-axial ellipsoids are used as surfaces of reference and generally known, typical cartographic projections are used. In the case of small, very irregularly shaped objects such as the moons Phobos and Deimos, the application of traditional solutions is insufficient. In such cases, four-, five- or six-axis ellipsoids are used as surfaces of reference and projected on the plane. Another interesting solu-

tion is provided by so-called morphographic representations, in which the representation formulas are functions of three parameters, i.e. planetocentric latitude and longitude and a variable radius.

Other factors contributing to the improved quality of today's planetary cartography products include the collection of increasingly accurate source data and the establishing of standards for the interpretation and classification of topographic objects on the surface of celestial bodies. The application of GIS-type software supports the automation and standardization process for the preparation of specialist studies.

There is a need to create common, centralised repositories of cartographic products, supported by relevant metadata, in order to facilitate access to such products both for laymen and specialist users. As far as specialist studies are concerned, the aspects that require uniformization are the standards of elaboration, division into sheets and the system of cartographic symbols. The necessity to support cartographic quality control results mainly from the development of GIS technologies, which led to the fact that maps are still more often created by experts from areas other than cartography.

Translated by A. Kozłowska