

PAWEŁ PĘDZICH
Zakład Kartografii
Wydział Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej
ppedzich@gik.pw.edu.pl

Od kartografii kosmosu do kartografii molekularnej – przegląd zastosowań odwzorowań kartograficznych

Zarys treści. Celem artykułu jest przedstawienie roli odwzorowań kartograficznych we współczesnym świecie map i baz danych oraz pokazanie znaczenia odwzorowań kartograficznych nie tylko w kartografii, ale także w innych dziedzinach nauki i praktyki. Mimo upływu ponad dwóch tysięcy lat od pojawienia się pierwszych odwzorowań kartograficznych, mimo zmian technologicznych, odwzorowania nadal odgrywają istotną rolę, co spróbowano wykazać w niniejszym artykule.

W artykule opisano szereg zastosowań odwzorowań kartograficznych, m.in. w opracowaniu map wielkoskalowych do celów geodezyjnych, map topograficznych i przeglądowo-topograficznych, map

zamieszczanych w atlasach geograficznych i historycznych, map nieba i ciał niebieskich, map statystycznych, map anamorficznymi, map propagandowych, globusów (także wirtualnych), map w GIS, map internetowych, zdjęć fotograficznych oraz odwzorowań stosowanych w kartografii molekularnej i krystalografii. Omówiono także odwzorowania kartograficzne, w których minimalizuje się zniekształcenia odwzorowawcze, co jest jednym z podstawowych kryteriów ich doboru.

Słowa kluczowe: odwzorowania kartograficzne, zasady doboru odwzorowań kartograficznych, zniekształcenia odwzorowawcze, minimalizacja zniekształceń odwzorowawczych

1. Wstęp

Historia odwzorowań kartograficznych liczy już ponad 2000 lat. Pierwsze odwzorowania opracowano na potrzeby sporządzania map nieba. W miarę upływu lat oraz rozwoju wielu dziedzin życia powstawały nowe rodzaje map, a wraz z nimi nowe odwzorowania kartograficzne. W XVIII i XIX wieku nastąpił rozwój matematyki, pojawiły się takie jej działy jak rachunek różniczkowy, rachunek całkowy oraz funkcje zmiennej zespolonej. Spowodowało to dalszy rozwój kartografii matematycznej i opracowanie nowych, bardziej złożonych odwzorowań kartograficznych. Poszukiwaniem nowych projekcji kartograficznych zajmowali się wielcy matematycy, m.in. C.F. Gauss, J.L. Lagrange, P. Czebyszew, J.H. Lambert, którzy wnieśli ogromny wkład w rozwój kartografii matematycznej. Rozwój technik komputerowych umożliwił opracowanie nowych odwzorowań spełniających różne interesujące kryteria. W okresie dwóch tysięcy

lat opracowano setki odwzorowań kartograficznych, które znalazły wiele zastosowań.

O sposobach doboru odwzorowań kartograficznych, w zależności od celów, jakim służy mapa, napisano wiele książek i artykułów. Znana w Polsce i wielokrotnie cytowana w literaturze praca F. Uhorczaka (1962) przedstawia zastosowanie odwzorowań kartograficznych na potrzeby map małoskalowych. Na świecie również powstało wiele opracowań na ten temat, np. publikacje J.P. Snydera (1987, 1993). Mimo to warto przybliżyć tę problematykę czytelnikom, zwłaszcza w czasach, gdy mapy wykonywane są coraz powszechniej przez osoby bez wykształcenia w tym zakresie.

2. Odwzorowania map małoskalowych w atlasach geograficznych i historycznych

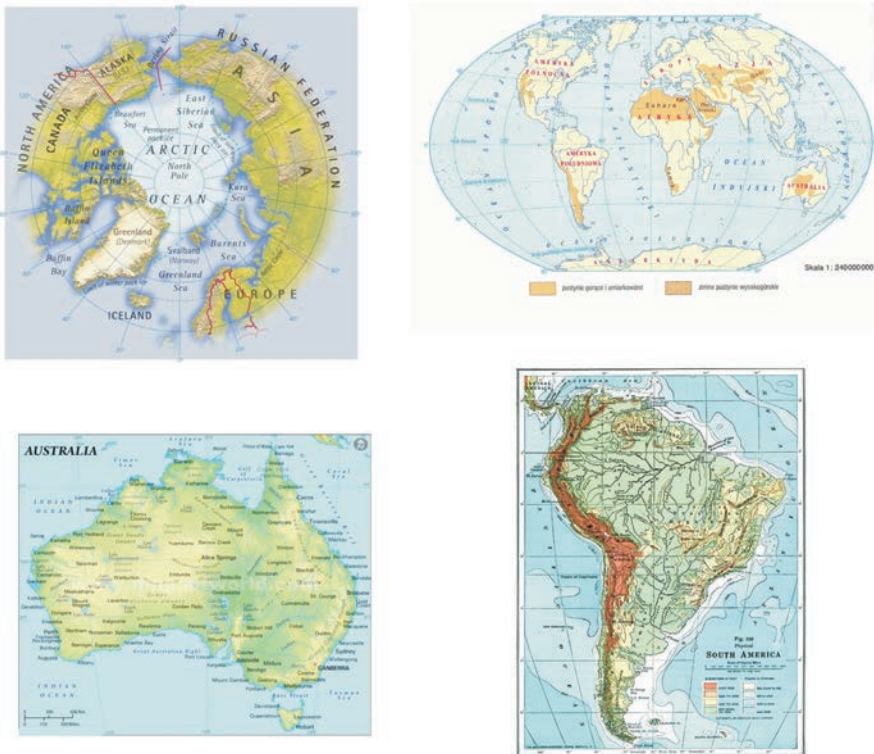
W przypadku map małoskalowych zamieszczanych w atlasach geograficznych i historycznych dobiera się odwzorowania głównie

w zależności od prezentowanego obszaru. Do map całego globu ziemskiego stosuje się najczęściej odwzorowania Aitoffa, Hammera, Mollweidego (B. Ogorzelska 2006). J.P. Snyder (1987) wymienia ponadto odwzorowania Eckerta IV i VI, McBryde'a, Boggsa, Robinsona oraz odwzorowania sinusoidalne, a także walcowe Mercatora i Millera. Do przedstawiania na mapach półkul używane są odwzorowania azymutalne poprzeczne: Lamberta, Postela, Nicolosiego lub stereograficzne i ortograficzne, a do map obszarów podbiegunowych odwzorowania azymutalne normalne Lamberta, Postela, stereograficzne i ortograficzne. Z kolei do opracowania map kontynentów najczęściej wykorzystuje się odwzorowania stożkowe Albersa, Lamberta, Delisle'a, Ptolomeusza, pseudostożkowe Bonne'a, azymutalne Lamberta, Postela i stereograficzne w położeniu ukośnym (B. Ogorzelska 2010). Przykładowe mapy w różnych odwzorowaniach przedstawiono na rycinie 1.

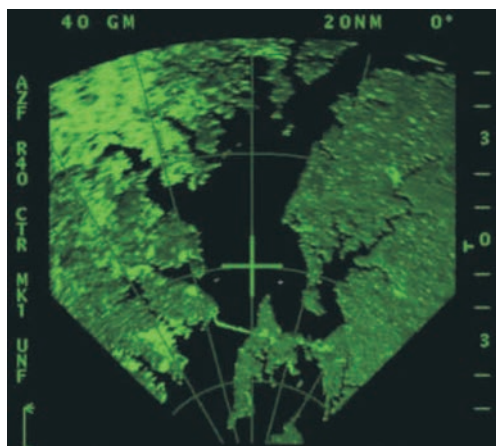
3. Odwzorowania stosowane w nawigacji

W przypadku map nawigacyjnych tradycyjnie dominują odwzorowania Mercatora, Postela i gnomoniczne. Odwzorowanie Postela stosowane jest w radiokomunikacji morskiej i lądowej oraz do sporządzania map telekomunikacyjnych, ze względu na zachowanie długości linii wychodzących z punktu centralnego mapy (ryc. 2).

W odwzorowaniu gnomonicznym wszystkie ortodromy odwzorowują się na linie proste i dlatego jest ono stosowane do map nawigacyjnych przeznaczonych do planowania długich rejsów. Ze względu na duże zniekształcenia, na mapach w tym odwzorowaniu nie należy przedstawiać wielkich obszarów kuli ziemskiej. Odwzorowanie Mercatora z uwagi na konforemność i prostoliniowe odwzorowanie łoksodrom również znajduje zastosowanie w nawigacji (ryc. 3).



Ryc. 1. Przykłady odwzorowań kartograficznych stosowanych do opracowania małoskalowych map geograficznych



Ryc. 2. Zobrazowanie radarowe w odwzorowaniu Postela (www.radary.az.pl/mapowanie.php)

Odwzorowanie loksodrom na linie proste jest pożądaną własnością odwzorowań stosowanych w nawigacji. Niestety, zniekształcenia długości loksodrom w odwzorowaniu Mercatora są dosyć znaczne. Interesującym przykładem zachowania długości i azymutów loksodrom

tych loksodromy poprowadzone z punktu centralnego zachowują długości i azymuty. Innym interesującym odwzorowaniem mogącym znaleźć zastosowanie w nawigacji jest odwzorowanie azymutalne dwupunktowe (ryc. 5), zaprezentowane przez Hansa Maurera w 1914 oraz Charlesa F. Close'a w 1922 roku. Jest to odwzorowanie azymutalne zmodyfikowane, które nie jest ani równopolowe ani równokątne. Ma ono dwa punkty, z których wszystkie kierunki są zachowane. Może znaleźć zastosowanie do wyznaczenia położenia statku na morzu, jeśli znane jest np. dokładne położenie nadajników radiowych i kierunki ze statku do tych nadajników. Ci sami autorzy zaprezentowali odwzorowanie o nazwie dwupunktowe równoodległościowe, które zachowuje długości linii łączących dwa wybrane punkty na sferze z każdym innym punktem tej sfery. Odwzorowanie to może być zastosowane do wyznaczenia odległości do statku na morzu, jeśli jest znane jego położenie pomiędzy początkiem i końcem podróży.

Szereg odwzorowań kartograficznych znalazło zastosowanie w systemach ECDIS (Electronic Chart Display Information System). W począt-



Ryc. 3. Morska mapa nawigacyjna w odwzorowaniu Mercatora (<http://www.yachtcharters-croatia.com/pl/croatian-nautical-maps.htm>)

są tzw. odwzorowania loksymutalne (ryc. 4). Są to odwzorowania pseudowalcowe, ani konforemne ani równopolowe. W odwzorowaniach

owym okresie jako domyślne najczęściej stosowano odwzorowanie Plate Carree, a także odwzorowanie Mercatora, ale nie było to regułą.



Ryc. 4. Odwzorowanie loksymtalne
(J.P. Snyder 1987)



Ryc. 5. Odwzorowanie dwupunktowe azymutalne
równoodległościowe
(<https://ktwop.files.wordpress.com/2012/09/unusual-map-projections-tobler-1999.pdf>)

W praktyce ze względu na brak międzynarodowych standardów dotyczących zastosowania odwzorowań kartograficznych w ECDIS, systemy komercyjne dają różne możliwości wyboru odwzorowań (A. Pallikaris 2014):

- W niektórych systemach stosowane jest jedno odwzorowanie bez możliwości wyboru innych. Jeśli jest to odwzorowanie Mercatora, system nie pozwala na przedstawienie map obszarów okołobiegunowych.

- W niektórych systemach użytkownik może wybierać z określonej liczby odwzorowań kartograficznych.

- W niektórych systemach wybór odwzorowania jest dokonywany automatycznie w zależności od położenia i wielkości obszaru wyświetlonego na ekranie. Wybór odbywa się najczęściej między dwoma odwzorowaniami, tj. Mercatora i azymutalnym stereograficznym.

4. Odwzorowania map topograficznych i przeglądowo-topograficznych

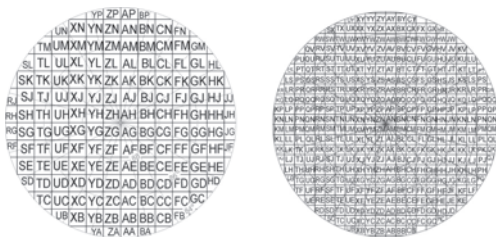
Na całym świecie do opracowania map topograficznych standardem jest odwzorowanie Uniwersalne Poprzeczne Mercatora (UTM). Stanowi ono modyfikację opracowanego wcześ-

niej odwzorowania Gaussa-Krügera, ze stałą skalą 0.9996 na południkach osiowych sześciostopniowych stref odwzorowawczych. Zmodyfikowane lub niezmodyfikowane odwzorowanie Gaussa-Krügera znalazło szerokie zastosowanie do opracowania map topograficznych w Polsce po drugiej wojnie światowej. Przyjmowano różne wartości skal na południkach osiowych w zależności od układu współrzędnych; i tak: w układzie „1942” skala jest równa 1, w układzie „1965” w strefie piątej skala równa się 0.999983, a w układzie „1992” – 0.9993. Dodajmy do tego stosowany w geodezji do opracowania mapy zasadniczej i jej pochodnych układ „2000”, w którym skala równa jest 0.999923, a otrzymujemy szereg odwzorowań konforemnych walcowych poprzecznych.

W opracowaniu map topograficznych wydanych po drugiej wojnie światowej zastosowanie znalazło także odwzorowanie Roussilhe’a. W Polsce znane pod nazwą odwzorowania quasi-stereograficznego, zostało wykorzystane w jednostrefowym odwzorowaniu GUGIK 1980, w czterech strefach układu „1965”, a przed drugą wojną światową do opracowania map Wojskowego Instytutu Geograficznego.

Sięgając dalej wstecz, do opracowania map topograficznych stosowano również odwzorowania Bonne’a i Cassiniego-Soldnera. To ostatnie było użytkowane w XIX i XX w. przez wiele państw europejskich. Na początku drugiej połowy XIX wieku zastosowano je w Wielkiej Brytanii do map topograficznych – początkowo z niezależnymi układami współrzędnych dla każdego okręgu administracyjnego, a później z trzydziestoma dziewięcioma mniejszymi układami odwzorowawczymi. Odwzorowanie to stosowane było w Wielkiej Brytanii do 1919 roku. W roku 1752 francuski hydrograf Rigobert Bonne wykorzystał odwzorowanie Ptolemeusza i w krótkim czasie stało się ono podstawą konstrukcji map topograficznych w różnych państwach, głównie Francji, gdzie zastąpiło odwzorowanie mapy Cassiniego. W 1821 roku przyjęto odwzorowanie Bonne’a za podstawę konstrukcyjną nowej mapy Francji w skali 1:80 000. Rosja również zainteresowała się tym odwzorowaniem, przyjmując je w 1845 roku do mapy topograficznej w skali 1:126 000.

Na współczesnych mapach przeglądowo-topograficznych stosuje się odwzorowanie stożkowe równokątne Lamberta do map w skalach 1:500 000 i 1:1 000 000. Stanowi ono w Polsce



Ryc. 6. Siatka UPS w odwzorowaniu azymutalnym stereograficznym (opracowanie własne)

podstawę konstrukcji państwowego układu współrzędnych o nazwie PL-LCC (Lambert Conformal Conic); jest stosowane także przez wiele krajów do map przeglądowo-topograficznych oraz lotniczych map nawigacyjnych. Natomiast do opracowania map topograficznych obszarów okołobiegunowych standardem jest odwzorowanie azymutalne równokątne stereograficzne, które stosuje się także w wojskach NATO jako podstawę konstrukcji siatki meldunkowej UPS (Universal Polar Stereographic; ryc. 6) (Zarząd Geografii Wojskowej 2000).

5. Odwzorowania stosowane w GIS i analizach przestrzennych

Odwzorowania kartograficzne pełnią podwójną rolę w systemach informacji geograficznej. Stosowane są jako podstawa wykonywania map prezentujących wyniki analiz przestrzennych oraz jako podstawa obliczeń i różnorodnych analiz. Ponieważ współczesne oprogramowanie GIS pozwala na stosunkowo łatwą transformację danych między różnymi odwzorowaniami kartograficznymi, więc każdy użytkownik – mniej lub bardziej świadomie – może opracować własną mapę w dowolnie wybranym przez siebie odwzorowaniu. Może przy tym skorzystać z zasygnalizowanych w artykule zasad doboru odwzorowań kartograficznych.

Według M. Maher (2010) to użytkownik decyduje o wyborze odwzorowania kartograficznego w wykonywanym przez siebie projekcie. Autorka podaje ogólne zasady doboru odwzorowań kartograficznych w GIS. Przede wszystkim nie poleca stosowania do zapisu współrzędnych obiektów układu współrzędnych geograficznych, jako swobodnego odwzorowania walcowego, ponieważ w systemach GIS wykonuje się m.in. obliczenia powierzchni, które mogą być zrealizowane w jednostkach

kątowych. Podaje ona kryteria stosowania odwzorowań w zależności od skali mapy, położenia i wielkości regionów geograficznych, np. odwzorowanie stożkowe równopolewe Albersa najlepiej nadaje się do przedstawiania obszarów położonych w średnich szerokościach geograficznych na mapach obejmujących obszary średniej wielkości.

Stosując narzędzia GIS można ułatwić sobie wykonanie określonych zadań oraz zwiększyć dokładność obliczeń poprzez dobór właściwego odwzorowania kartograficznego. Na przykład, dokonując transformacji danych zgromadzonych w bazie danych do odwzorowania równopolewego możemy przeprowadzić obliczenia pól powierzchni obiektów i uzyskać wyniki zbliżone do rzeczywistych wartości tych pól na elipsoidzie lub sferze. Dobranie parametrów odwzorowania w celu minimalizacji zniekształceń odwzorowawczych zwiększy dokładność tych obliczeń.

Problemem zastosowania odwzorowań kartograficznych do obliczania pól powierzchni wieloboków geodezyjnych zajmowała się M. Kuźma (2013), która przeanalizowała własności wybranych odwzorowań równopolewych oraz przebadła wpływ zniekształceń na wielkość obliczanych pól powierzchni wieloboków geodezyjnych oraz wielkości redukcji pól tych powierzchni.

Przy opracowaniu map przedstawiających wyniki analiz przestrzennych, np. w odniesieniu do określonych powierzchni jednostek przestrzennych, stosujemy odwzorowania równopolewe. Wykonując mapy transportu, na podstawie których obliczane są odległości do jednego celu, np. bazy firmy transportowej, można zastosować odwzorowanie ukośne azymutalne równoodległościowe. Wyznaczając długość jakiegoś obiektu liniowego, np. gazociągu przebiegającego przez obszar Polski ze wschodu na zachód, możemy dokonać transformacji danych do odwzorowania równoodległościowego, np. Cassiniego-Soldnera. Do wypuklenia jakiegoś elementu treści znajdującego się w określonym miejscu mapy można zastosować odwzorowanie anamorficzne.

Warto nadmienić również, że w Polsce na potrzeby analiz przestrzennych i sprawozdawczości na poziomie ogólnoeuropejskim wprowadzono układ o nazwie PL-LAEA (Lambert Azimuthal Equal Area). Zastosowano w nim odwzorowanie ukośne azymutalne równopolewe Lamberta.

Problemem przy identyfikacji i wyborze odwzorowania w oprogramowaniu GIS jest często nieujednoczone nazewnictwo odwzorowań i układów współrzędnych. Dlatego w systemach informacji geograficznej podjęto próbę standaryzacji używanej terminologii. Stosowany jest m.in. system kodowania przyjęty przez European Petroleum Survey Group (EPSG) w celu standaryzacji nazewnictwa i parametrów układów współrzędnych. EPSG to organizacja naukowa związana z europejskim przemysłem paliwowym, składająca się ze specjalistów z geodezji, miernictwa oraz kartografii, pracujących przy poszukiwaniach ropy naftowej. Organizacja ta opracowała EPSG Geodetic Parameter Set – bazę danych, w której zawarte są informacje o parametrach definiujących kształt Ziemi, elipsoidach odniesienia, systemach współrzędnych geograficznych, odwzorowaniach kartograficznych, jednostkach miary itd. (<http://www.gis-support.pl/co-to-jest-epsg/>). Baza dostępna jest na stronie <https://www.epsg-registry.org/>.

Innym standardem dotyczącym odwzorowań stosowanym w programach typu GIS jest PROJ4. Jest to biblioteka transformacji kartograficznych pierwotnie napisana dla systemu UNIX przez G. Evendena, zaadaptowana przez Służbę Geologiczną USA (USGS). Obecnie znajduje zastosowanie w większości programów typu Open Source oraz w programach komercyjnych do wykonywania transformacji między układami współrzędnych (M. Rzeszewski, J. Jasiewicz 2009).

Kolejnym standardem zapisu parametrów odwzorowań jest format WKT (Well Known Text). Format ten wydaje się być najprostszym do zrozumienia i stąd jego wykorzystywanie przez wiele narzędzi komputerowych podczas wyświetlania systemu odniesień przestrzennych dla danego zbioru danych. Na przykład pliki .prj połączone z shapefiles ArcGIS używają formatu WKT ESRI (<https://www.nceas.ucsb.edu/scicomp/recipes/projections>).

6. Odwzorowania map internetowych

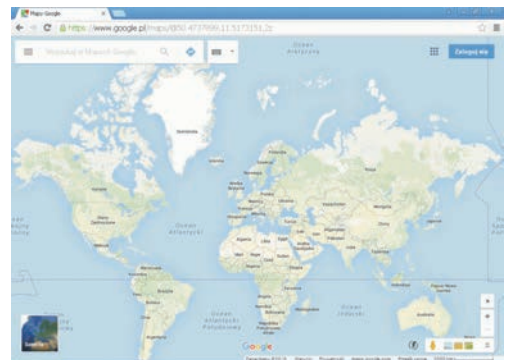
Mapy zamieszczane w Internecie mogą być opracowywane w różnych odwzorowaniach w zależności od celu i przeznaczenia. Na szczególną uwagę zasługuje tu odwzorowanie o nazwie WebMercator, które jest modyfikacją odwzorowania Mercatora i stanowi standard

w internetowych aplikacjach mapowych, takich jak Google Maps, Bing Maps i MapQuest. Funkcje odwzorowawcze mają tu następującą postać:

$$x = \frac{128}{\pi} 2^{\text{zoom level}} (\lambda + \pi) \text{ pixels}$$

$$y = \frac{128}{\pi} 2^{\text{zoom level}} \left(\pi - \ln \left[\tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \right] \right) \text{ pixels}$$

Stosowane jest ono w formie odwzorowania sferycznego, nawet przy odwzorowaniu współrzędnych elipsoidalnych. Powoduje to, że w przypadku przyjęcia za powierzchnię oryginału elipsoidy, nie jest ono *stricte* konforemne; również loksodromy nie odwzorowują się dokładnie na linie proste. Ze względu na proste formuły odwzorowawcze daje ono możliwość



Ryc. 7. Mapa Google w odwzorowaniu WebMercator; na monitorze widoczna jest tylko część mapy, stąd jej prostokątny, a nie kwadratowy kształt (<https://www.google.pl/maps/>)

szybkich obliczeń komputerowych. Funkcje odwzorowawcze są tak skonstruowane, aby dopasować układ do współrzędnych ekranu. Ponieważ w odwzorowaniu Mercatora bieguny odwzorowują się w nieskończoności, mapa całego świata w odwzorowaniu WebMercator jest ograniczona do pasa między równoleżnikami o szerokościach geograficznych $\pm 85.051129^\circ$. W ten sposób mapa całego świata mieści się w kwadracie (ryc. 7).

Odwzorowanie WebMercator jest nieodpowiednie do map przedstawiających cały glob lub dla obszarów wielkości kontynentów albo dużych krajów (tj. map w małych skalach), po-

nieważ generuje szereg problemów (B. Jenny 2012):

- ogromne zniekształcenia pól powierzchni w dużych szerokościach geograficznych,
- powierzchnie obiektów położonych w różnych szerokościach geograficznych nie mogą być wizualnie porównane, ponieważ użytkownicy map nie są w stanie skompensować dużych zniekształceń pól powierzchni,
- niemożliwość pokazania całej powierzchni Ziemi, ponieważ bieguny odwzorowują się w nieskończoności,
- pewne rodzaje wizualizacji danych są trudne do interpretacji, np. kartogramy lub mapy kropkowe wymagają zastosowania odwzorowań równopolewych.

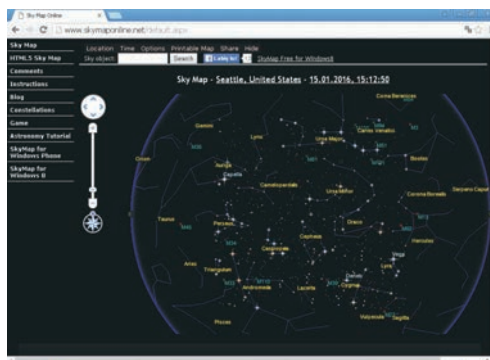
W celu uniknięcia tych niedogodności B. Jenny (2012) zaproponował do opracowania map internetowych zastosowanie tzw. złożonych odwzorowań adaptacyjnych. Typ odwzorowania i jego parametry są dobrane w sposób dynamiczny, tak aby geometria mapy zmieniała się w sposób „bezszywowy” i bez wizualnej nieciągłości w trakcie dokonywania przez użytkownika zmian skali i długości geograficznej południka środkowego. W porównaniu z odwzorowaniem WebMercator takie rozwiązanie posiada następujące zalety (B. Jenny 2012):

- odwzorowanie może być opcjonalnie równopolewe dla wszystkich skal, co skutkuje wiernym odwzorowaniem powierzchni,
- obszary okołobiegunowe są możliwe do zaprezentowania na mapach,
- przedstawienie obszarów położonych w dużych szerokościach geograficznych nie wiąże się z ogromnymi zniekształceniami.

7. Odwzorowania map nieba i ciał niebieskich

Kolejnym interesującym zastosowaniem odwzorowań kartograficznych są mapy nieba oraz ciał niebieskich. Już ponad dwa tysiące lat temu Hipparch (II wiek p.n.e.) stosował odwzorowanie azymutalne ortograficzne do obliczeń astronomicznych.

Mapy nieba można podzielić na mapy gwiazd, konstelacji i galaktyk. Do opracowania map półkul sfery niebieskiej używa się powszechnie odwzorowań azymutalnych (ryc. 8). Odwzorowanie gnomoniczne stosuje się do prezentacji trajektorii meteorów, a odwzorowanie stereograficzne do przedstawiania grup galaktyk. Ze



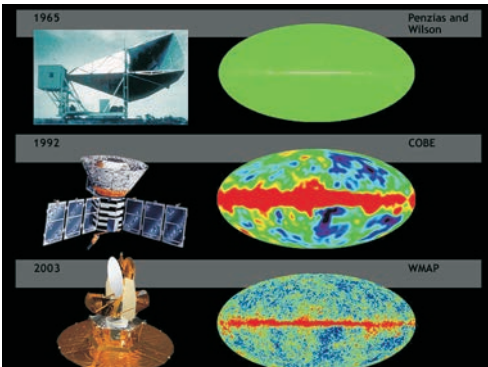
Ryc. 8. Mapa nieba wykonana w odwzorowaniu azymutalnym (<http://www.skymaponline.net/instructions.html>)

stosowanych dawniej odwzorowań można wymienić odwzorowanie trapezoidalne, które ze względu na prostotę i łatwość konstrukcji wykorzystywano do opracowania map nieba – w epoce renesansu i w XVII wieku. Przykłady można znaleźć w XVII-wiecznym atlasie nieba J. Bayera i J. Heweliusza. W tym odwzorowaniu równoleżniki są liniami prostymi wzajemnie równoległymi, a południki liniami prostymi zbiegającymi się niekoniecznie w tym samym punkcie. Układ obrazów południków i równoleżników tworzy w rezultacie trapez. To odwzorowanie pozwala na pomiar odległości pomiędzy gwiazdami za pomocą prostego narzędzie z prostoliniową krawędzią. Ze względu na zniekształcenia, na mapach tego typu przedstawiano niewielkie obszary. Odwzorowanie to jest ostatnio rzadko używane (N. Kanas 2007).

Ze względu na niewielkie zniekształcenia bardzo często natomiast są obecnie stosowane odwzorowania stożkowe. Słynny niemiecki astronom Johann Bode używał tego odwzorowania w swoim atlasie nieba z 1801 r. Unikalne odwzorowanie tzw. sinusoidalne (Sansona-Flamsteeda) spopularyzował John Flamsteed w atlasie nieba z 1729 roku (N. Kanas 2007).

Mapy nieba wykonuje się również w celu prezentacji zjawisk występujących w kosmosie. Przykładem są mapy przedstawiające rozkład tzw. mikrofalowego promieniowania tła czyli inaczej promieniowania relikowego. Promieniowanie to jest pozostałością po wczesnych etapach ewolucji Wszechświata i prawie jednorodnie wypełnia przestrzeń kosmiczną. W 1965 roku amerykańscy astrofizycy A.A. Pen-

zias i R.W. Wilson podczas prób nowej anteny do odbioru fali o długości około 3 cm wykryli istnienie fal docierających do anteny z każdego kierunku. W 1989 r. wystrzelono pierwszego satelitę przeznaczony do badań kosmologicznych Cosmic Background Explorer (COBE), który został wyposażony w przyrząd do wyszu-



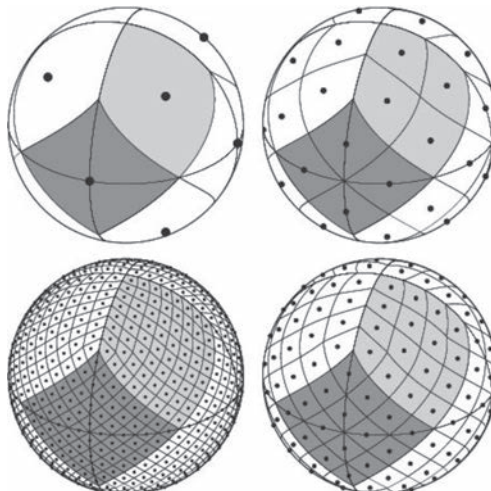
Ryc. 9. Mapy wyników badań promieniowania relikowego (<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:BigBangNoise.jpg>)

kiwania nieregularności mikrofalowego promieniowania tła. Z kolei w 2001 r. wystrzelono sondę kosmiczną amerykańskiej agencji NASA WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), mającą za zadanie mierzenie temperatury

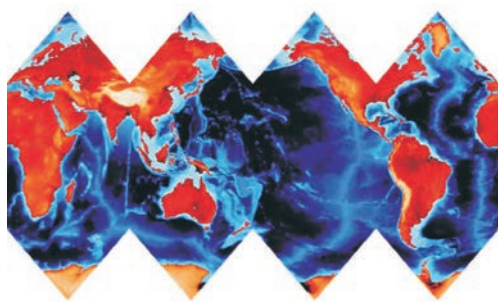
promieniowania relikowego (wraz z jej rozkładem kątowym). Była to następną po COBE misją kosmologiczną. Wyniki tych badań prezentują mapy na rycinie 9. Interesujący jest sposób opracowania tych map. Zastosowano tzw. metodę pikselizacji sfery o nazwie HEALPIX (Hierarchical Equal Area iso-Latitude Pixelization) (ryc. 10). Metodę opracowano w celu wspomaganie hierarchicznej struktury bazy danych obiektów rozmieszczonych na sferze. Piksele charakteryzują się równymi polami powierzchni oraz rozkładem środków pikseli o równych szerokościach geograficznych. Autorem metody jest K.M. Górski (K.M Górski i in. 1998). Mapy prezentujące wyniki analiz wykonane są najczęściej w odwzorowaniu Mollweidego.

Istnieje także odwzorowanie o nazwie HEALPIX, złożone z odwzorowania walcowego obszaru okolorównikowego i strefowego odwzorowania Collignon dla obszarów podbiegunowych (ryc. 11).

Innym interesującym zagadnieniem z zakresu kartowania kosmosu jest dobór odwzorowań dla map przedstawiających pozaziemskie ciała niebieskie. Problem ten opisano w wielu pracach (m.in. P. Pędzich, K. Latuszek 2014a i 2014b). Niektóre ciała niebieskie (duże planety) mają kształt zbliżony do kuli lub elipsoidy. Stosuje się wówczas odwzorowania kartograficzne analogiczne jak dla powierzchni Ziemi, np. często wykorzystuje się odwzorowanie ortograficzne



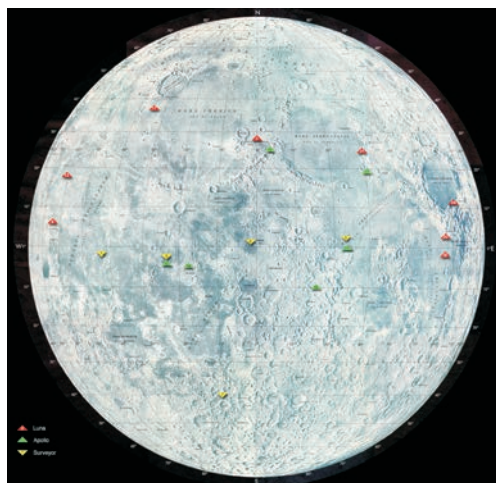
Ryc. 10. Pikselizacja sfery HEALPIX (<http://healpix.jpl.nasa.gov/healpixBackgroundPurpose.shtml>)



Ryc. 11. Mapa Ziemi w odwzorowaniu HEALPIX (http://www.das.inpe.br/school/AdvancedCourse/pdfs/Gorski_lecture.pdf)

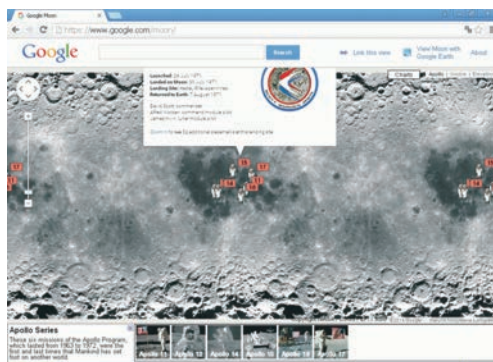
do map obrazowych przedstawiających półkule planet lub księżyców (ryc. 12).

Istnieją również wersje odwzorowań perspektywicznych dobierane specjalnie do przedstawiania wybranych ciał niebieskich,



Ryc. 12. Mapa Księżyca w odwzorowaniu ortograficznym (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/planets/moonpage.html>)

np. odwzorowanie AMS (Army Map Service) Lunar projection, które jest odwzorowaniem perspektywicznym wybranym przez Alberta L. Nowickiego w 1963 r. do przedstawienia nieco więcej niż półkuli Księżyca widocznej z Ziemi (J.P. Snyder 1987). W serwisach inter-



Ryc. 13. Google Moon w odwzorowaniu WebMercator (<https://www.google.com/moon/>)

netowych ciał niebieskich często stosowane jest odwzorowanie WebMercator (ryc. 13).

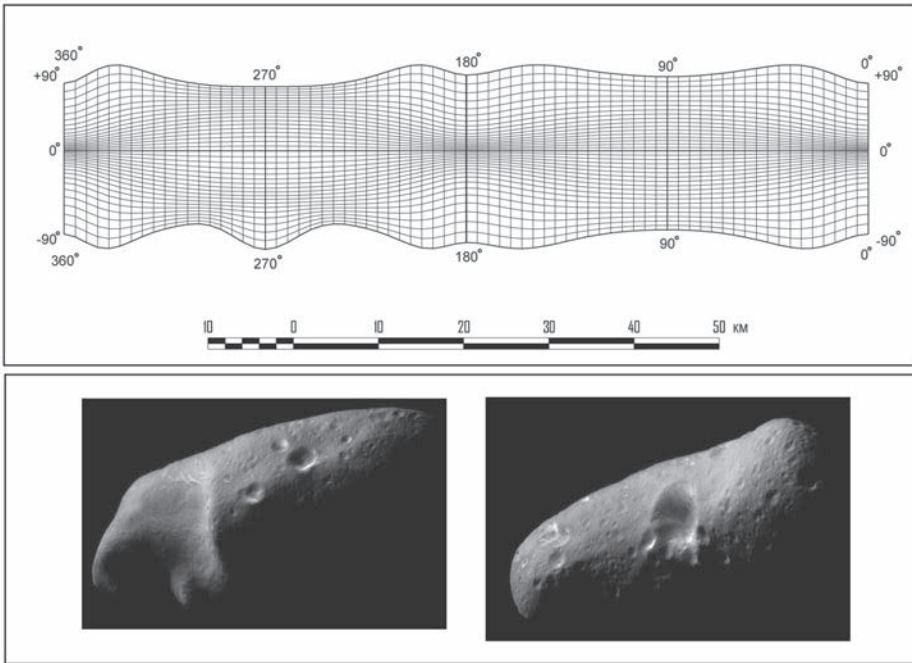
Oprócz obiektów o regularnych kształtach istnieje szereg nieregularnych obiektów pozaziemskich, do których kartowania wykorzystuje się niestandardowe odwzorowania kartograficzne. Zaliczamy do nich odwzorowania elipsoid wieloosiowych (ryc. 14) lub odwzorowania morfograficzne (ryc. 15). Te ostatnie zasługują na szczególną uwagę, ponieważ pozwalają odtworzyć na płaszczyźnie w sposób szczególnie nierówności powierzchni kartowanego obiektu. Formuły matematyczne w odwzorowaniach morfograficznych są funkcjami trzech zmiennych: dwóch współrzędnych oznaczających położenie szczegółu na powierzchni ciała niebieskiego oraz jego promienia:

$$x = f_1(R_i, \phi, \lambda)$$

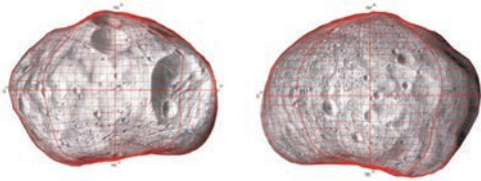
$$y = f_2(R_i, \phi, \lambda)$$

8. Odwzorowania map i zdjęć wykonanych z orbity Ziemi

Wracając z dalekiego kosmosu na orbitę Ziemi warto zwrócić uwagę na odwzorowania kartograficzne zaprojektowane specjalnie do sporządzania map poprzez łączenie zdjęć satelitarnych w jeden ciągły obraz. W latach 1973–1979 A.P. Colvocoresses, J.P. Snyder i J.L. Junkins opracowali odwzorowania o nazwie Space Oblique przeznaczone do zobrazowań satelitarnych. Można wyróżnić dwa



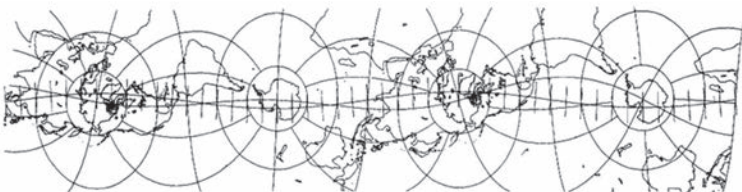
Ryc. 14. Odwzorowanie kartograficzne walcowe równoodległościowe elipsoidy sześciosiowej (M. Nyrtsov i inni 2007)



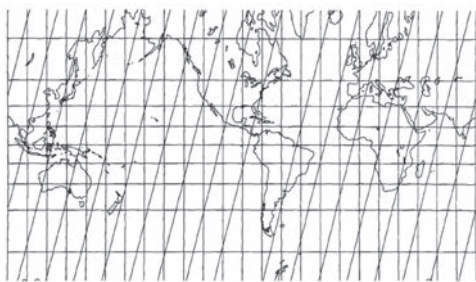
Ryc. 15. Odwzorowanie morfograficzne Fobosa jednego z dwóch księżyców Marsa (M. Nyrtsov 2003)

takie odwzorowania: Space Oblique Mercator (ryc. 16) oraz Space Oblique Conic. Pierwsze jest zmodyfikowanym odwzorowaniem walcowym Mercatora z powierzchnią obrazu (mapy)

definiowaną przez parametry orbit satelitar-nych. Zostało ono zaprojektowane specjalnie do wykonywania map poprzez łączenie zdjęć satelitarnych w jeden ciągły obraz. Odwzorowanie to jest w zasadzie konforemne, zwłaszcza na obszarze skanowania satelitarnego. Wszystkie południki i równoleżniki są liniami krzywymi oprócz południka w każdym podejściu do bieguna. Ślad satelity na powierzchni Ziemi, który jest krzywą na powierzchni globu, odwzorowuje się wiernie jako krzywa na mapie. Odwzorowanie jest polecane do stosunkowo wąskich pasów wzdłuż śladu satelity. Odwzorowania kartograficzne przeznaczone do prezentacji śladów satelitów znane są w literaturze



Ryc. 16. Odwzorowanie Space Oblique Mercator (J.P. Snyder 1987)



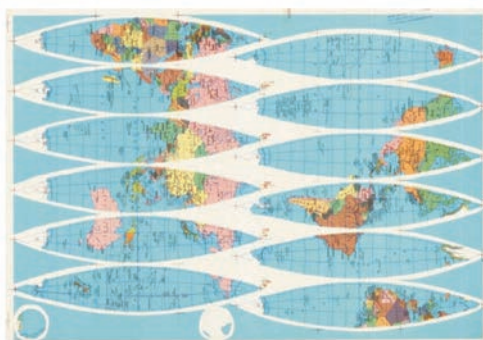
Ryc. 17. Odwzorowanie walcowe Satellite-Tracking (J.P. Snyder 1987)

anglojęzycznej jako „Satellite-tracking projections” (ryc. 17) (J.P. Snyder 1987). Wszystkie ślady satelitów o tych samych parametrach orbit odwzorowują się jako linie proste. Stosowane są odwzorowania walcowe i stożkowe, które nie są ani konforemne ani równopolowe. Konforemność pojawia się jedynie na dwóch wybranych równoleżnikach. Skala długości jest równa 1 na jednym z tych równoleżników w odwzorowaniu stożkowym oraz na obu w odwzorowaniu walcowym. Odwzorowania te zostały opracowane w 1977 r. przez J.P. Snydera (1987).

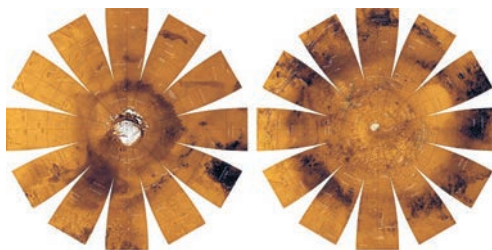
9. Odwzorowania do konstrukcji globusów i odwzorowania wielościenne

Mimo oczywistych możliwości prezentacji powierzchni Ziemi w przestrzeni trójwymiarowej, globusy wymagają również zastosowania odwzorowań kartograficznych. K. Wagner zalecał do tego celu odwzorowanie Cassiniego-Soldnera, przy czym kulę ziemską dzieli się tu na południkowe pasy (ryc. 18). Stosuje się także odwzorowania sinusoidalne, np. Sansona oraz pseudostożkowe. Obszary podbiegunowe (powyżej 80°) opracowuje się w odwzorowaniu azymutalnym stereograficznym lub odwzorowaniu Postela (M. Gede 2009). Wykonywane są nie tylko globusy Ziemi, ale także innych planet. Na rycinie 19 zaprezentowano mapę opracowaną na potrzeby globusa Marsa.

Do przygotowania pseudotrójwymiarowych globusów wirtualnych również stosowane są odwzorowania kartograficzne. Modele wykonywane w formacie KML (Keyhole Markup Language) wymagają serii obrazów w odwzorowaniu Plate Carree oraz walcowym równoodległo-



Ryc. 18. Pasy mapy do globusa w odwzorowaniu Cassiniego-Soldnera (M. Gede 2009)



Ryc. 19. Mapa do globusa Marsa w odwzorowaniu Lamberta i poprzecznym Mercatora (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA02992>)

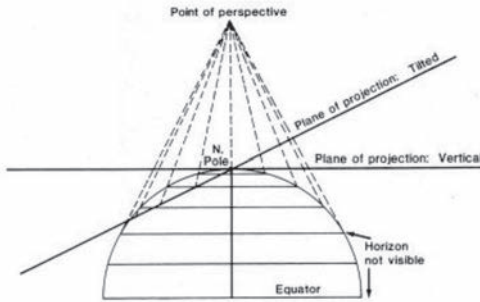


Ryc. 20. Wirtualny globus Word Wind (J.P. Snyder 1987)

ściowym. Natomiast modele VRML (Virtual Reality Modelling Language) wymagają dwóch różnych rodzajów odwzorowań: dwa obszary podbiegunowe odwzorowania azymutalnego równoodległościowego, a cztery obszary

rów równikowych odwzorowania Plate Carree. Następcą formatu VRML jest X3D, standard ISO bazujący na formacie XML, mającym wszystkie możliwości VRML w zakresie opracowania wirtualnych globusów (M. Gede 2015).

Niezależnie od użytego odwzorowania kartograficznego, efekt końcowy oglądamy w odwzorowaniach rzutowych z różnych perspektyw.



Ryc. 21. Odwzorowanie perspektywiczne (J.P. Snyder 1987)

Google Earth lub NASA World Wind (ryc. 20) pokazują kulę ziemską w taki sposób, jak jest ona widoczna z kosmosu. Stosuje się do tego celu odwzorowanie rzutowe ogólne. Jeśli kamera jest ustawiona dokładnie naprzeciw środka Ziemi, mamy do czynienia z perspektywą pionową – odwzorowaniem normalnym. W innych przypadkach jest to ukośne odwzorowanie perspektywiczne (ryc. 21).

W przypadku globusów w formacie VRML sfera ziemską jest aproksymowana za pomocą wielościanu. Tego typu rozwiązania stosowane są w kartografii od wieków. W 1525 roku Albrecht Dürer zaproponował odwzorowanie sfery na wielościan jako aproksymację powierzchni globusa. Odwzorowania te pełnią dwie role: przedstawiają z niewielkimi zniekształceniami powierzchnię Ziemi lub innego ciała niebieskiego na płaszczyźnie oraz służą do konstruowania globusów. Ponieważ odwzorowania wielościenne dzielą powierzchnie w regularny sposób, odnoszą się do problemu dzielenia sfery, który jest istotny w reprezentacji i strukturze danych w bazach danych geograficznych (S. Huang i inni 1998; D. Van Leeuwen, D. Strebe 2006).

W 1943 r. magazyn „Life” opublikował odwzorowanie sfery na sześćo-ośmiościan. Odwzo-

rowanie to opracował R. Buckminster Fuller, a było ono jednym z odwzorowań zaproponowanych przez Dürera. Interesującym aspektem tego rozwiązania jest odwzorowanie krawędzi wielościanu ze stałą skalą. Z kolei w 1946 r.



Ryc. 22. Odwzorowanie powierzchni Księżyca na dwudziestościan (<http://solarviews.com/cap/ico/icomoon.htm>)



Ryc. 23. Globus Ziemi w postaci sześciianu (http://kidbots.com/WEBADD/BUCKMINSTER_FULLER_TYPE_MAPS/MAPS_THAT_FOLD/proj-Poly.html)

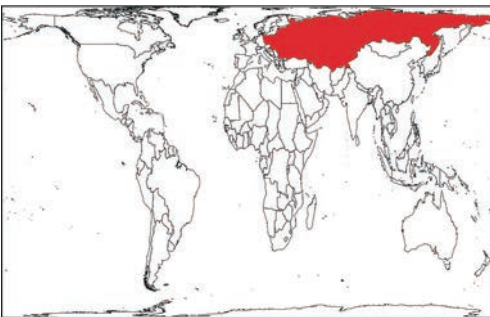
Bradley opublikował równopolowe odwzorowanie walcowe na dwudziestościan (D. Van Leeuwen, D. Strebe 2006). Mapy pięciu płaszczyznowych brył są znane od wielu lat (I. Fisher, O. Miller 1944). Są one wykonane w odwzorowaniach równopolowych i konforemnych (J.P. Snyder 1993). Na rycinach 22 i 23 przedstawiono przykłady odwzorowań wielościennech.

10. Odzworowania map statystycznych, propagandowych i odzworowania anamorficzne

Mapy statystyczne opracowywane są przede wszystkim w odzworowaniach równopółkowych. Służą one do prezentacji zjawisk i tendencji ich zmian, a stosowane metody kartograficzne odnoszą się często do pól powierzchni. Przykładowo, rozmieszczenie jakiegoś atrybutu przedstawia się za pomocą metody kropkowej, a gęstość w odniesieniu do pola powierzchni i wówczas niezbędne jest zastosowanie odzworowania kartograficznego równopółkowego. Tego typu odzworowania stosuje się również na mapach politycznych, aby pokazać poprawne wielkości krajów oraz właściwe proporcje między nimi.

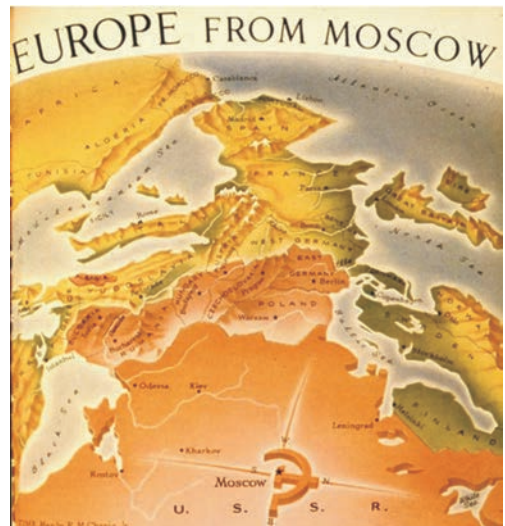


Ryc. 24. Mapa świata w odzworowaniu Mercatora (<http://www.learnnc.org/lp/editions/mapping/6434>)



Ryc. 25. Mapa świata w odzworowaniu Petersa (<http://www.learnnc.org/lp/editions/mapping/6434>)

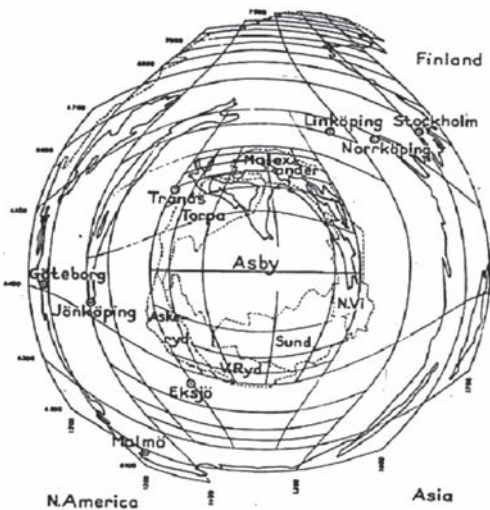
Odzworowania kartograficzne ze względu na różne rozkłady zniekształceń doskonale nadają się do opracowania map propagandowych. Na przykład odzworowanie Mercatora ma niewielkie zniekształcenia odzworowanej pół powierzchni w okolicach równika, które szybko rosną wraz ze wzrostem szerokości geograficznej. Powoduje to, że kraje leżące w dużych szerokościach geograficznych mają na mapie pozornie nieproporcjonalnie większe powierzchnie od krajów położonych w niskich szerokościach. W czasach zimnej wojny przedstawianie świata na mapie w odzworowaniu Mercatora powodowało, że państwa Układu Warszawskiego zajmowały znacznie większy obszar niż w rzeczywistości (ryc. 24), co mogło mieć wpływ na postrzeganie sytuacji politycznej na świecie. Natomiast mapa wykonana w odzworowaniu Petersa przedstawia zupełnie inne proporcje tych samych obszarów kuli ziemskiej (ryc. 25). Odzworowanie to wprowadził w 1972 r. A. Peters jako tzw. odzworowanie „sprawiedliwości społecznej”. Wzbudziło ono początkowo wielki opór ze strony środowiska kartograficznego, lecz obecnie często jest stosowane na mapach UNESCO. Również zastosowanie odzworowań rzutowych może wpływać na postrzeganie sytuacji politycznej.



Ryc. 26. Mapa *Europe from Moscow* opublikowana przez R.M. Chapina, jr. w czasopiśmie „Time” 10 marca 1952 r. (<http://www.learnnc.org/lp/editions/mapping/6434>)

Europa Zachodnia widziana z perspektywy pokazanej na rycinie 26 mogła czuć się zagrożona ze strony Związku Radzieckiego.

Do opracowania map propagandowych doskonale nadają się tzw. odwzorowania anamorficzne. W wyniku ich zastosowania można



Ryc. 27. Mapa migracji wokół szwedzkiego miasta Asby w odwzorowaniu anamorficznym (T. Hägerstrand 1957)

powiększyć jakiś obszar lub uwypuklić pokazywane na mapie zjawisko. Studiując migracje wokół szwedzkiego miasta Asby, T. Hägerstrand w 1957 użył logarytmu długości jako skali radialnej w opracowaniu przez siebie odwzorowaniu. To spowodowało wzrost skali w centrum Asby, w pobliżu którego miała miejsce większość migracji (T. Hägerstrand 1957, ryc. 27).

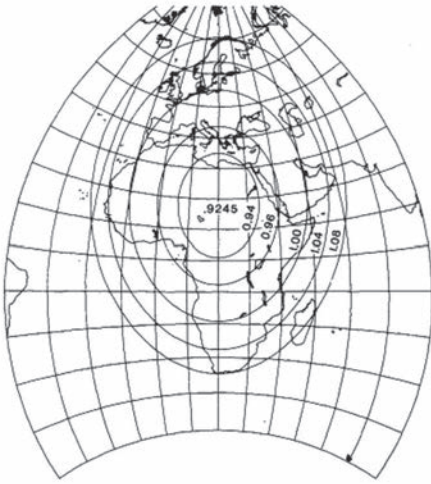
Odwzorowania anamorficzne dzielimy na złożone i dystorsyjne. Odwzorowania złożone to połączenie dwóch różnych lub tych samych lecz przeskalowanych w odpowiedni sposób typów odwzorowań. Druga grupa odwzorowań bazuje na istniejących już mapach o zadanym odwzorowaniu i skali głównej, przekształconych tak, aby otrzymać powiększenie wybranego obszaru mapy. Przykładami takich odwzorowań są: odwzorowanie wieloogniskowe, odwzorowanie dwuogniskowe, rybie oko, perspektywiczna ściana, odwzorowanie wykonane metodą Harrie, Sarjakowskiego i Lehto oraz odwzorowanie azymutalne logarymiczne.

Wśród interesujących opracowań na temat odwzorowań anamorficznych warto wymienić pracę S. Garbarczyk-Walus (2010). Autorka przebadła szereg aspektów związanych z zastosowaniem odwzorowań anamorficznych do prezentacji danych topograficznych oraz zaproponowała dwa nowe odwzorowania anamorficzne z zastosowaniem funkcji sinus i arcus tangens.

11. Odwzorowania o minimalnych zniekształceniach i ich zastosowania

Jednym z podstawowych kryteriów wyboru odwzorowań kartograficznych jest wielkość zniekształceń odwzorowawczych. Od wieków poszukiwanie odwzorowań kartograficznych o minimalnych zniekształceniach jest podstawowym zadaniem kartografii matematycznej. Z perspektywy zastosowań odwzorowania takie można podzielić na te, które da się zastosować do prezentacji zjawisk o charakterze globalnym na mapach całego świata oraz stosowane do map niewielkich obszarów, a więc odwzorowania kartograficzne o minimalnych zniekształceniach dla map małoskalowych i wielkoskalowych. Zagadnieniem tym zajmowano się również w odniesieniu do odwzorowań kartograficznych konforemnych, równopolowych oraz pośrednich, czyli takich w których w równym stopniu minimalizowane są zniekształcenia zarówno pól powierzchni jak i kątów.

Pierwsze prace na temat minimalizacji zniekształceń odwzorowawczych powstały w XIX wieku. Wymienić tu można prace A. Tissota, G. Airy'ego i P. Czebyszewa. Mieli oni znaczący wkład w rozwój teorii zniekształceń odwzorowawczych oraz ich minimalizacji. Twórcą teorii zniekształceń odwzorowawczych był A. Tissot, który w 1881 r. przedstawił metodę konstrukcji odwzorowania o minimalnych zniekształceniach w postaci rozwinięcia funkcji odwzorowawczych w szereg potęgowy. W 1861 roku G. Airy opracował odwzorowanie azymutalne pośrednie między odwzorowaniem konforemnym a równopolowym. Miało ono minimalne zniekształcenia zgodnie z zaproponowanym kryterium całkowym. W 1853 roku P. Czebyszew sformułował twierdzenie o „najlepszych” odwzorowaniach konforemnych posiadających najmniejsze zniekształcenia długości. Według tego twierdzenia w klasie odwzoro-



Ryc. 28. Odwzorowanie stereograficzne Millera (J.P. Snyder 1987)

wań konforemnych najmniejsze zniekształcenia długości ma to odwzorowanie, w którym skala na brzegu obszaru jest stała.

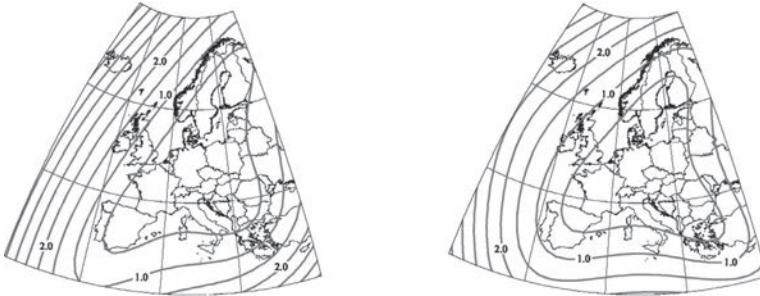
Powstało wiele interesujących odwzorowań spełniających twierdzenie P. Czebyszewa. W 1953 r. O. Miller opracował zmodyfikowane odwzorowanie stereograficzne dla Europy i Afryki, gdzie linie stałych zniekształceń mają kształt owali (ryc. 28). J.P. Snyder opracował zmodyfikowane stereograficzne odwzorowanie konforemne dla Stanów Zjednoczonych (bez Alaski i Hawajów), o obszarze ograniczonym przez izoskalę w kształcie prostokąta z zaokrąglonymi narożnikami (ryc. 29). Opracowano także odwzorowania spełniające kryterium P. Czebyszewa dla obszaru Polski (ryc. 30). Maksymalne zniekształcenia długości w tym odwzorowaniu wynoszą około 36 cm/km. Uzyskano wynik znacznie lepszy od stosowanych w pracach geodezyjno-kartograficznych odwzorowań konforemnych jednostrefowych obszaru Polski.

W 1898 r. N.J. Cinger postawił hipotezę, że twierdzenie Czebyszewa (udowodnione dla odwzorowań równokątnych) jest słuszne również dla odwzorowań równopółowych. B. Kawrajski skonstruował jednak odwzorowanie, za pomocą którego wykazał, że hipoteza N.J. Cingera jest niesłuszna. Problem minimalizacji zniekształceń w odwzorowaniach równopółowych pozostaje nadal otwarty.



zniekształceń odwzorowawczych w odwzorowaniach równopolewych oznacza dążenie do uzyskania jak najmniejszych zniekształceń kątów. Interesującym sposobem minimalizacji

szeregi dwuparametrowych wielomianów stopnia piątego, gdzie parametrami były szerokość i długość geograficzna na sferze lub współrzędne płaskie pewnego odwzorowania wyj-



Ryc. 31. Odwzorowanie Cantersa dla Europy Zachodniej (F.F. Canters 2002)



Ryc. 32. Odwzorowanie Snydera (J.P. Snyder 1987)

zniekształceń w odwzorowaniach równopolewych są tzw. transformacje wielomianowe istniejących odwzorowań kartograficznych (J.P. Snyder 1987, F. Canters 2002). F. Canters poszukiwał odwzorowań odpowiednich do przedstawiania powierzchni Europy na mapach w małych skalach. Mapy w tych odwzorowaniach zaprezentowano na rycinach 31 i 32.

F. Canters (2002) zastosował bezgradientową metodę Neldera-Meada do optymalizacji rozkładu zniekształceń odwzorowań sfery dla opracowań małoskalowych. Optymalizował on odwzorowania całego globu opisane przez

ściowego. Za funkcję celu przyjmowana była wartość zrewidowanej miary Petersa (F. Canters 2002), porównującej dużą liczbę losowo wybranych odległości na powierzchni oryginału z odpowiadającymi im odległościami na powierzchni obrazu (K. Latuszek 2013).

Duże możliwości w zakresie minimalizacji zniekształceń mają odwzorowania kartograficzne pośrednie między równokątnymi i równopolewymi. Odwzorowania tego typu minimalizują zniekształcenia zarówno kątowe jak i pól powierzchni. Zagadnieniem tym zajmował się m.in. K. Latuszek (2013, 2015), który w 2015 r. opracował zoptymalizowane ze względu na kryterium Airy'ego odwzorowanie wielostozkowe obszaru Polski, przedstawiając trzy modele parametryczne odwzorowania wielostozkowego. Dla ustalonej liczby parametrów modele te zostały zoptymalizowane z wykorzystaniem zmodyfikowanego algorytmu optymalizacji nieliniowej Neldera-Meada. Odwzorowania te mogą znaleźć zastosowanie w prezentacji danych na mapach zarówno w dużych jak i małych skalach.

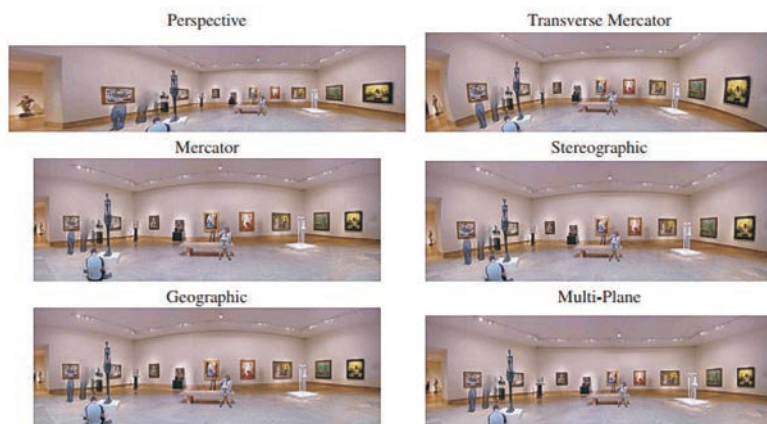
12. Odwzorowania kartograficzne stosowane w fotografii

Odwzorowania kartograficzne znajdują również zastosowanie w fotografii. Zdjęcia szerokokątne mają znaczne zniekształcenia obrazu i do rozwiązywania tego problemu wykorzystuje się odwzorowania kartograficzne.

Informacja wizualna widziana z pojedynczego punktu jest definiowana na sferze widzenia o środku w punkcie obserwacji. Aby uzyskać płaski obraz sfery musimy ją odwzorować na płaszczyznę (R. Carroll, M. Agrawala, A. Agarwala 2009). Dyskusję na temat ograniczeń i możliwości zastosowania odwzorowań kartograficznych do przedstawiania na płaszczyźnie

Obrazy w odwzorowaniu stereograficznym są podobne do wykonanych obiektywem „rybie oko”, a także do obrazów o szerokim polu widzenia wykonanych w perspektywie krzywoliniowej.

Odwzorowania można dobierać w zależności od scen, a w obrębie tej samej sceny mogą uwypuklać wybrane obiekty i ich cechy (R. Carroll, M. Agrawala, A. Agarwala 2009).



Ryc. 33. Panoramy w różnych odwzorowaniach kartograficznych (L. Zelnik-Manor i in. 2005)

obrazu sfery widzenia przeprowadzili L. Zelnik-Manor, G. Peters i P. Perona (2005).

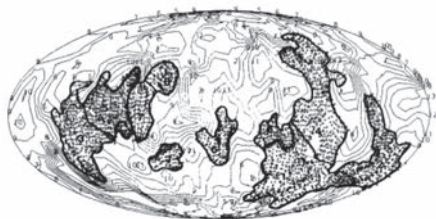
Najpowszechniej znane i stosowane w fotografii jest odwzorowanie gnomoniczne. Większość fotografii wykonuje się za pomocą soczewek, które przybliżają liniową perspektywę, ponieważ ta projekcja zachowuje wiele pożądanych własności. Linie w scenie pozostają proste, jednak ma ona bardzo duże zniekształcenia na zdjęciach o dużym polu widzenia. Gdy pole widzenia zbliży się do 180 stopni, zniekształcenia obrazu wzrastają do nieskończoności. Odwzorowania gnomoniczne mogą być stosowane do zdjęć o kącie do 40 stopni.

Odwzorowanie Mercatora można zastosować z kolei do panoram 360 stopni, jednak w ograniczonym zakresie kąta pionowego, gdy bowiem pionowy kąt widzenia zbliży się do 90 stopni, zniekształcenia rosną do nieskończoności. Odwzorowanie Mercatora jest więc użyteczne do zdjęć panoramicznych o dużym horyzontalnym polu widzenia, np. zdjęć dużej grupy ludzi (R. Carroll, M. Agrawala, A. Agarwala 2009).

L. Zelnik-Manor, G. Peters i P. Perona (2005) przeanalizowali wiele odwzorowań i ich własności oraz wpływ różnych parametrów tych odwzorowań na ostateczną postać obrazu. Zaproponowali też uniwersalne rozwiązanie



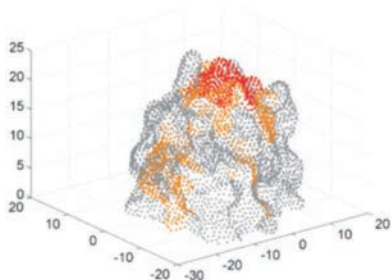
Ryc. 34. Panorama sferyczna „Globe panorama” wykonana przez Alexandre Duret-Lutz (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Globe_panorama.jpg#/media/File:Globe_panorama.jpg)



Ryc. 35. Powierzchnia mioglobiny w odwzorowaniu Mollweidego (D. Fanning i in. 1986)



Ryc. 36. Powierzchnia mioglobiny w odwzorowaniu Mercatora (D. Fanning i in. 1986)



Ryc. 37. Mapy przedstawiające skomplikowane kształty białek (H. Yang, R. Qureshi, A. Sacan 2012)

do prezentacji panoram, tzw. odwzorowanie wielopłaszczyznowe. Odwzorowanie to pomnaża punkty widzenia w tej samej panoramie w celu uzyskania bardziej atrakcyjnego rezultatu. Wyniki ich pracy prezentuje rycina 33.

Odwzorowania kartograficzne znajdują również zastosowanie przy tworzeniu interesujących zobrazowań, jakimi są panoramy sferyczne, będące rodzajem fotografii obejmującej cały widok wokół aparatu – 360 stopni w poziomie i 180 w pionie. W celu wykonania takich panoram stosowane są odwzorowania stereograficzne (ryc. 34).

Odwzorowania kartograficzne można zastosować również do przekształcania zdjęć w celu opracowania panele widokowego. Takie podejście oraz badanie zastosowanych odwzorowań przedstawiono w pracy P. Pędzicha i H. Gałacha (2014).

13. Odwzorowania stosowane w kartografii molekularnej i krystalografii

Odwzorowania kartograficzne mogą być stosowane do map nieregularnych obiektów

o bardzo małych rozmiarach i dzięki temu są przydatne w tzw. kartografii molekularnej, będącej metodą ilościowego opisu trójwymiarowej topografii powierzchni białek za pomocą map konturowych. Mapy konturowe zachowują lokalne obiekty topograficzne i jednocześnie prezentują ilościowy całościowy wygląd powierzchni (D. Fanning i in. 1986). Sporządzane są wówczas „mapy” przedstawiające na płaszczyźnie skomplikowane struktury białek, np. mioglobiny. W pierwszych odwzorowaniach tego typu jako powierzchnie oryginału przyjmowano sferę lub elipsoidę (ryciny 35, 36), później stosowano również bardziej złożone kształty (H. Yang, R. Qureshi, A. Sacan 2012) (ryc. 37).

Odwzorowania kartograficzne znajdują także zastosowanie w krystalografii. Odwzorowanie stereograficzne zostało wprowadzone do krystalografii w 1839 przez W.H. Millera. Stosuje się je w celu wiernej prezentacji kątów pomiędzy normalnymi ścian, co oznacza możliwość przedstawienia trójwymiarowych obiektów na płaszczyźnie z wiernym zachowaniem kątów.



Ryc. 38. Odwzorowanie retroazymutalne dla Mekki
(https://www.mapmathematics.com/Downloads/Geocart_Manual.pdf)



Ryc. 39. Logo Stowarzyszenia Geografów
Amerykańskich

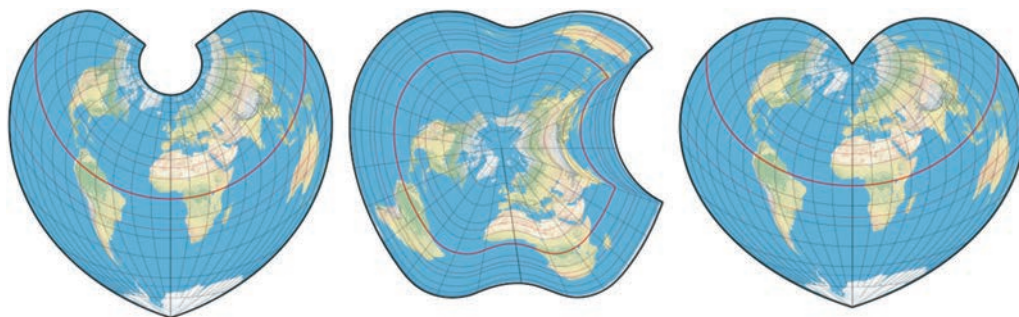


Ryc. 40. Odwzorowania kartograficzne w logach
MAK i ONZ

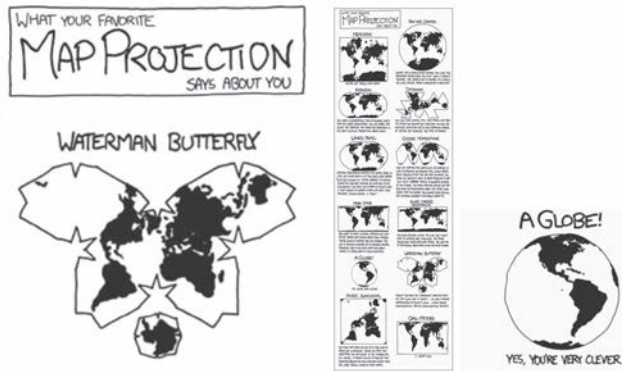
14. Inne odwzorowania o interesujących własnościach i zastosowaniach

Szereg nietypowych odwzorowań kartograficznych o interesujących własnościach zaprezentował W. Tobler (2008) w artykule pt. *Unusual map projections* oraz w prezentacji zamieszczonej na stronie <https://ktwop.files.wordpress.com/2012/09/unusual-map-projections-tobler-1999.pdf>. Kilka z tych odwzorowań przedstawiono w niniejszym artykule. Jednym z nich jest odwzorowanie retroazymutalne, opracowane przez J. Craiga w 1909 r. (ryc. 38). Jego podstawową własnością jest zachowanie azymutów z każdego punktu do punktu centralnego. Tego typu odwzorowanie zaprojektowano dla Mekki (tzw. Mekka projection). Mapa w tym odwzorowaniu stanowi pomoc dla wyznawców islamu w wyznaczeniu kierunku w stronę Mekki. Innym zastosowaniem tego odwzorowania było ułatwienie rozszaniem po świecie brytyjskim kolonistom takiego kierunku ustawienia anteny, aby odbierać sygnał radiowy wysłany z Rugby w Wielkiej Brytanii (W. Tobler 2008).

W 1879 r. H. Berghaus zaprezentował mapę świata w kształcie gwiazdy. Zastosowane odwzorowanie nosi nazwę „star projection” i jest używane w celach dekoracyjnych, m.in. przez Stowarzyszenie Geografów Amerykańskich jako logo tej organizacji (ryc. 39). W logach innych organizacji także można znaleźć odwzorowania kartograficzne, np. Organizacja Narodów Zjednoczonych wykorzystuje odwzorowanie Postela, a Międzynarodowa Asocjacja Kartograficzna odwzorowanie Mollweidego (ryc. 40).



Ryc. 41. Odwzorowania kartograficzne do celów dekoracyjnych opracowane przez Daniela Strebe
(https://www.mapmathematics.com/Downloads/Geocart_Manual.pdf)



Ryc. 42. Wybór odwzorowania kartograficznego może wiele powiedzieć o twórcy mapy (<https://xkcd.com/977/>)

Istnieje także wiele innych odwzorowań kartograficznych przeznaczonych do tzw. celów dekoracyjnych służących mapom o charakterze ozdobnym. Na rycinie 41 przedstawiono kilka siatek kartograficznych w takich odwzorowaniach zaproponowanych przez D. Strebe (1992–2010).

15. Podsumowanie

Odwzorowania kartograficzne nierozłącznie towarzyszą kartografii od przeszło dwóch tysięcy lat. Na ich rozwój znaczny wpływ miał rozwój matematyki i informatyki. Z biegiem czasu zmienia się ich rola i współcześnie jest ona nieco inna niż dawniej. Odwzorowania kartograficzne stosuje się zarówno w celu prezentacji zjawisk jak i w celu wykonywania obliczeń i analiz kartometrycznych. Opisane w artykule zastosowania odwzorowań kartograficznych pokazują, jak bardzo istotną rolę pełniły i nadal pełnią. Zgromadzona na ich temat wiedza jest ogromna, a więc trudno oczekiwać od współczesnych twórców i użytkowników map umiejętności swobodnego poruszania się w tym obszarze wiedzy, szczególnie w przypadku osób zajmujących się wykonywaniem

map, ale nie będących profesjonalnymi kartografami. Przedstawiony w artykule opis odwzorowań kartograficznych można potraktować jako swojego rodzaju przewodnik po ich zastosowaniach w różnych dziedzinach nauki i praktyki. Artykuł zawiera także wskazówki odnośnie do kryteriów doboru odwzorowań. Mimo wypracowanych zasad doboru nie można wykluczyć ich stosowania przez użytkowników map według własnego uznania, szczególnie do opracowania map prezentujących wyniki własnych badań.

W kontekście różnorodności odwzorowań kartograficznych oraz ich wyboru, przed którym stoi twórca mapy, można przytoczyć pewien humorystyczny opis charakteru osób preferujących określone odwzorowania. Autor zamieszczonej na stronie internetowej (<https://xkcd.com/977/>) ilustracji w formie żartu udziela odpowiedzi na następujące pytanie – co twoje ulubione odwzorowanie kartograficzne mówi o tobie (ryc. 42). Spośród wielu odpowiedzi wybór może wydawać się oczywisty. Ale tak jak to pokazano w niniejszym artykule, nawet wybierając globusy i tak nie da się uniknąć odwzorowań kartograficznych.

Literatura

Canters F., 2002, *Small-scale map projection design*. London, New York: Taylor & Francis.
Carroll R., Agrawala M., Agarwala A., 2009, *Optimizing content-preserving projections from wide-angles images*. „ACM SIGGRAPH conference proceed-

ings”, <http://vis.berkeley.edu/papers/capp/projection-sig09.pdf>
Fanning D., Smith J., Rose G., 1986, *Molecular cartography of globular proteins with application to antigenic sites*. „Biopolymers” Vol. 25, s. 863–883.

- Fisher I., Miller O.M., 1944, *World maps and globes*. New York: Essential Books.
- Garbarczyk-Walus S., 2010, *Metodyka konstruowania odwzorowań anamorficznych*. Politechnika Warszawska, Wydział Geodezji i Kartografii, rozprawa doktorska.
- Gdowski B., 1975, *Optymalne odwzorowania równopolewe*. „Geodezja i Kartografia” T. 24, nr 3, s. 191–204.
- Gede M., 2009, *The projection aspects of digitizing globes*. http://icaci.org/files/documents/ICC_proceedings/ICC2009/html/refer/10_1.pdf
- Gede M., 2015, *Novel globe publishing techniques using WebGL*. „e-perimetron” Vol. 10, no. 2, s. 87–93.
- Górski K.M., Hivon E., Wandelt B.D., 1998, *Analysis issues for large CMB data sets*. „Proceedings: Evolution of Large Scale Structure”, arXiv:astro-ph/9812350, <http://arxiv.org/pdf/astro-ph/9812350v1.pdf>
- Hägerstrand T., 1957, *Migration and area migration in Sweden*. „Lund Studies in Geography”, Series B, „Human Geography”, no. 13, Sweden, Royal University of Lund.
- Huang, S., Shibasaki R., Kasuya M., Takagi M., 1998, *Comparative study on spherical tessellation schemes for global GIS*. „Geocarto International” Vol. 13, issue 1, s. 3–14.
- Jenny B., 2012, *Adaptive composite map projections*. „IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics” Vol. 18, no. 12, s. 2575–2582.
- Kanas N., 2007, *Star maps. History, artistry, and cartography*. Berlin: Springer.
- Kuźma M., 2013, *Metodyka obliczania pól powierzchni geodezyjnych wieloboków elipsoidalnych z zastosowaniem odwzorowań równopolewych*. Politechnika Warszawska, Wydział Geodezji i Kartografii, rozprawa doktorska.
- Lapaine M., Usery E., 2015, *Map projections and reference systems*. http://mapyear.org/files/wom/09_IMY_WoM_en.pdf
- Latuszek K., 2013, *Zastosowanie metody optymalizacji nieliniowej Neldera-Meada do konstrukcji odwzorowań kartograficznych o możliwie najlepszym rozkładzie zniekształceń odwzorowawczych – na przykładzie odwzorowania azymutalnego*. „Roczniki Geomatyki” T. 11, z. 5 (62), s. 75–85.
- Latuszek K., 2015, *Optymalizacja odwzorowania wielostokowego Polski według kryterium Airy’ego*. „Roczniki Geomatyki” T. 13, z. 2 (68), s. 109–132.
- Maher, M., 2010, *Lining up data in ArcGIS*. ESRI Press.
- Nyrtsov M., 2003, *The classification of projections of irregularly-shaped celestial bodies*. W: „Proceedings 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., Strooke 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.
- Ogorzelska B., 2010, *Odwzorowania kartograficzne*. W: J. Paślowski (red.), *Wprowadzenie do kartografii i topografii*, Wrocław: Wydawnictwo Nowa Era, s. 81–168.
- Pallikaris A., 2014, *Choosing suitable map projections for worldwide depiction of electronic charts in ECDIS*, http://sssi.org.au/userfiles/docs/Weekly%20Newsletter/documents_14152302751707881897.pdf
- Pędzich P., 2005, *Conformal projection with minimal distortions*. W: „XXII Int. Cartographic Conference Proceedings”, La Coruna.
- Pędzich P., Gałach H., 2014, *Principles of digital ‘panneau’ cartographic visualisations*. „The Cartographic Journal” Vol. 51, no. 1, s. 87–98.
- Pędzich P., Latuszek K., 2014a, *Kartografia planetarna – przykłady opracowań, odwzorowania kartograficzne, nowe wyzwania*. „Polski Przegl. Kartogr.” T. 46, nr 4, s. 369–396.
- Pędzich P., Latuszek K., 2014b, *Odwzorowania kartograficzne nieregularnych obiektów pozaziemskich*. „Roczniki Geomatyki” T. 12, nr 2 (64), s. 231–244.
- Rzeszewski M., Jasiewicz J., 2009, *WebGIS – od map w internecie do geoprzetwarzania*. W: Z. Zwołński (red.), *GIS- platforma integracyjna geografii*, s. 23–33, Poznań.
- Snyder J.P., 1987, *Map projections. A working manual*. Washington: United Government Printing Office.
- Snyder J.P., 1993, *Flattening the Earth, Two thousand years of map projections*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Strebe D., 1992–2010, *Geocart User’s Manual*, https://www.mapmathematics.com/Downloads/Geocart_Manual.pdf
- Tobler W., 2008, *Unusual map projections*. „Cartographic Perspectives” No. 59, s. 28–40.
- Uhorczak F., 1962, *Obraz świata w siatkach kartograficznych*. W: „Geografia Powszechna” Tom I. *Ziemia – środowisko naturalne człowieka*. Warszawa: PWN, s. 102–120.
- Van Leeuwen D., Strebe D., 2006, *A Slice-and-dice approach to area equivalence in polyhedral map projections*. „Cartography and Geographic Information Science” Vol. 33, no. 4, s. 269–286.
- Yang H., Qureshi R., Sacan A., 2012, *Protein surface representation and analysis by dimension reduction*. „Proteome Science” 10 (Suppl. 1):S1, DOI:10.1186/1477-5956-10-S1-S1.
- Zarząd Geografii Wojskowej, 2000, *Polskie wojskowe mapy w standardach NATO (przewodnik)*, Ministerstwo Obrony Narodowej
- Zelnik-Manor L., Peters G., Perona P., 2005, *Squaring the circle in panoramas*. „Computer Vision” 2005. ICCV 2005. Tenth IEEE International Conference, Vol. 2, s. 1292–1299.

Źródła internetowe

<https://www.nceas.ucsb.edu/scicomp/recipes/projections>
<http://www.gis-support.pl/co-to-jest-epsg/>
<https://xkcd.com/977/>

<https://www.epsg-registry.org/>
<https://ktwop.files.wordpress.com/2012/09/unusual-map-projections-tobler-1999.pdf>

From cartography of the Universe to molecular cartography – the use of map projections

Summary

Contemporary map projections are widely used in the elaboration of various types of maps and spatial databases. Systems of geographical information provide their users with the significant opportunities in the choice of map projections, coordinate systems, their definitions and transitions between them. The role of map projections nowadays is a little bit different, than it was in the past. It can be considered in the context of the objectives, for which a map has to be used, needs of a user of this map, as well as the means of communication. The Internet, mobile devices and GIS caused, that the map projections are used for two main purposes: data visualization and performing of calculations and analyses. The maps are elaborated for a wide audience of users and present the results of analyses for individual users. Despite the changes, that occur in cartography, the role of map projections is still important. The rules for the applications of map projections developed over the centuries are still valid. However, the new rules resulting from the new functions of map projections are created.

The aim of the author of this article is to present a wide range of applications of map projections. The

article describes the use of both: these well-known and that less popular applications. It is the author's review of contemporary applications of map projections, as well as the old ones. We can find here, therefore, a description of map projections used for the elaboration of topographical maps, maps for general use and general topographical maps, large-scale maps for surveying, maps, which are published in geographical and historical atlases, maps of the sky and celestial bodies, statistical maps, anamorphic maps, propagandistic maps, globes and virtual globes, maps within the GIS, web maps, photographic images and map projections used in the molecular cartography and crystallography. Moreover, the map projections with the minimized distortions (distortion minimizing is one of the basic criteria for the selection of map projections), as well as the various lesser-known map projections of interesting properties, which can be used for presentation of different phenomena and issues, are described.

Keywords: map projections, rules for the selection of map projections, map projection distortion, distortion minimizing