

JURAND WOJEWODA

Instytut Nauk Geologicznych, Uniwersytet Wrocławski

Szukaj prostoty, lecz jej nie dowierzaj...

Alfred North Whitehead

Powierzchnie w geologii, powierzchnie geologiczne...

Inspiracja

Przestrzeń wyznacza granice naszego pojmowania rzeczywistości. Trudno sobie wyobrazić istnienie czegokolwiek bez przestrzeni. Postrzegana prostota przestrzeni upraszcza bycie (życie), często pomaga zrozumieć jego zasady, a czasem nawet przyczyny. Czy również upraszcza pojmowanie ich celowości? W tym zwykłym, ludzkim wymiarze, z założenia subiektywnym, egocentrycznym i nie bez wad, należy zachować nieufność wobec zmysłowego postrzegania przestrzeni, nie rezygnując jednak z przysłowiowej „brzytwy Ockhama” w praktycznej ocenie otaczających nas zjawisk i zachodzących wokół procesów. Warto też dodać, że odmienne widzenie/pojmowanie tej samej przestrzeni w tym samym czasie, często prowadzi do nie zamierzonych, wręcz niepożądanych konfliktów, czy kolizji...

Wstęp

Jednym z najważniejszych pojęć przestrzennych jest **powierzchnia**. I chociaż to **punkt** stanowi elementarny wyznacznik *przestrzeni euklidesowej*, a najprostsze formy geometryczne wyznaczają **linie** (*zbiory*) lub **odległości** między punktami (*wektory*), to właśnie powierzchnie najbardziej intuicyjnie odnoszą się do tego, co nazywamy przestrzenią. To one wyznaczają granice w przestrzeni. To one również wyznaczają, w klasycznym rozumieniu, granice materii, zwłaszcza tej ziemskiej. Ta stanowi przedmiot jakże materialnej dziedziny wiedzy o rzeczywistości – geologii. Słowo powierzchnia ma również swoje inne, potoczne znaczenia, np. jako zewnętrzna, łatwo dostrzegalna cecha obiektów, zjawisk, a nawet zdarzeń, poglą-

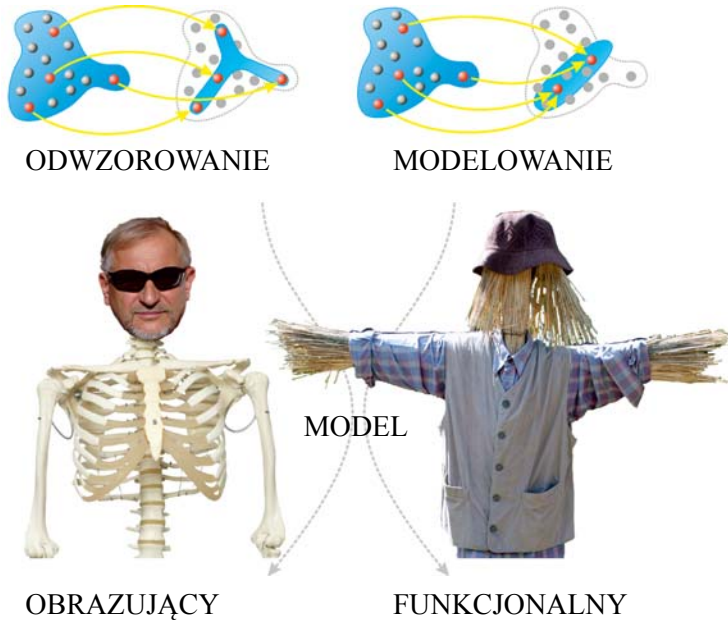
dów czy postrzegania czegoś. Często słowem tym ludzie posługują się w innym niż geometryczno-fizycznym znaczeniu, np. obszar, areal, pole, rozmiar, czy metraż. Czasem określa się nim pewne cechy powierzchni obiektów, jak gładź, faktura, lustro czy tafla.

Bez względu na przyjmowaną definicję powierzchni jako takiej, od zawsze podejmowane były próby opisu/przedstawienia powierzchni. Warto wspomnieć chociażby o dwóch metodach, lub raczej technikach postępowania stosowanych w praktyce, mianowicie o *odwzorowaniu* i *modelowaniu*. Różnicę między nimi w uproszczeniu ukazuje ilustracja (il. 1). I tak, w przypadku odwzorowania przestrzennego każdemu punktowi określonego zbioru przyporządkowujemy jeden i jedyny (!) jego odpowiednik, chociaż samo odwzorowanie nie musi obejmować wszystkich punktów tego zbioru. Zbiór wynikowy może mieć zmienione atrybuty wynikające ze sposobu (kodu) odwzorowania (transformacji, cechowania, znaczenia itp.). Z kolei modelowanie oznacza *de facto* kształtowanie nowej przestrzeni, czy zbioru punktów. Model może, ale nie musi mieć nic wspólnego z przestrzenią (obiektem), którą „modeluje” (naśladuje). Zasadnicza różnica jednak sprowadza się do tego, że odwzorowanie ma walor informacji o przestrzeni i ją obrazuje, natomiast model musi być w przede wszystkim funkcjonalny, czyli ma czemuś służyć. Nawet najlepiej wykonany szkic, czy rzeźba kolana, nie zastąpi, choćby i brzydkiej lecz funkcjonalnej jego protezy. Nawet najprecyzyjniej wykonany skan fotela władcy, nie zastąpi, choćby i brzydszego tronu *sensu stricto*... W naukach przyrodniczych i technice, również w geologii, najczęściej dochodzi do rozwiązań kompromisowych. Z jednej strony jest to leżące u ich podstawy fenomenologiczne poznanie zjawisk opierające się na odwzorowaniu, z drugiej strony dążenie do stworzenia najbardziej wiarygodnych i funkcjonalnych modeli zachodzących procesów.

Dobrym przykładem takiego kompromisu z zakresu nauk o Ziemi jest kartografia, w tym zwłaszcza kartografia geologiczna. Odwzorowanie **powierzchni Ziemi** zawsze było wyzwaniem dla ludzi. Na pierwszych szkicach ludzie odwzorowywali swoją najbliższą przestrzeń. Z czasem odwzorowania i modele powierzchni terenu stały się ponadregionalne, wręcz globalne.

Za najstarszy artefakt kartograficzny uznaje się szkic sytuacyjny pobliza jaskini Abauntz w Hiszpanii wykonany na kawałku wapienia ok. 13 660 lat temu (*paleolit*) (Utrilla i inni, 2009). Z kolei za najstarszy, zachowany szkic „geologiczny”¹ uznaje się obecnie wykonaną na papirusie mapę lokalizacyjną kamieniołomów, w których wydobywano m.in. surowiec skalny za rządów faraona Ramzesa IV, ale również ukazuje miejsca występowania/wydobycia złota oraz na kolorowo zaznaczone miejsca występowania różnych innych użytecznych kopalin. Jak się uważa, mapę tę, o wymiarach 2,8 m na 0,41 m, wykonał skryba królewski Amennakht

¹ Nazwa geologiczny tutaj w cudzysłowie, gdyż geologia, jako dziedzina nauki ukształtowała się dopiero na przełomie XVIII i XIX w.



II. 1. Ideogramy ukazujące różnicę między odwzorowaniem a modelem (wykorzystano źródła: Strach na wróble z Kaszubskiego Parku Etnograficznego we Wdzydzach (<http://www.pomoceszkolne24.pl>) oraz makietę szkieletu człowieka (<http://www.pomoceszkolne24.pl/szkielety/1/197>))

w 1150 r. p.n.e., a znaleziona została w Deir el-Medina w Tebach przez B. Drovettiego w roku 1824 i jest obecnie przechowywana w Muzeum Egizjo w Turynie (Harrell, Brown, 1992; McMahan, 1992).

Mapa obrazuje **powierzchnię terenu** (*mapa hipsometryczna*), ale jednocześnie może obrazować różne atrybuty tej powierzchni, jak rzędne wysokościowe, zbiorniki wodne oraz obiekty naturalne i antropogeniczne (*mapy topograficzne*). Mapa może obrazować budowę geologiczną powierzchni terenu, jak litologia oraz inne **powierzchnie geologiczne**, w tym **powierzchnie uskoków tektonicznych**, czy **powierzchnie warstwowania** skał (*mapy geologiczne*). Wszystkie ww. mapy w pierwszej kolejności stanowią odwzorowania rzeczywistej przestrzeni, chociaż ich wykorzystanie dla różnych celów przesądza jednocześnie o ich funkcjonalności. Ta natomiast w stopniu największym zależy od skali mapy i od zasobu informacji, czyli zupełności odwzorowania. *Podstawowe mapy geologiczne* mogą być wykonywane w różnej skali, w zależności od przeznaczenia i potrzeb. Mapy podstawowe w skali 1 : 100 000 i mniejszej określa się na ogół jako *mapy szczegółowe*. Mapy podstawowe w skalach większych określa się na ogół jako *mapy przeglądowe*. Te ostatnie, chociażby z powodu małej dokładności i zwykle znacznej generalizacji treści, należy traktować właśnie jako **modele powierzchni Ziemi**. Również do tej kategorii należą wszelkie opracowania ilościowe, statystyczne itp. Przykładowo,

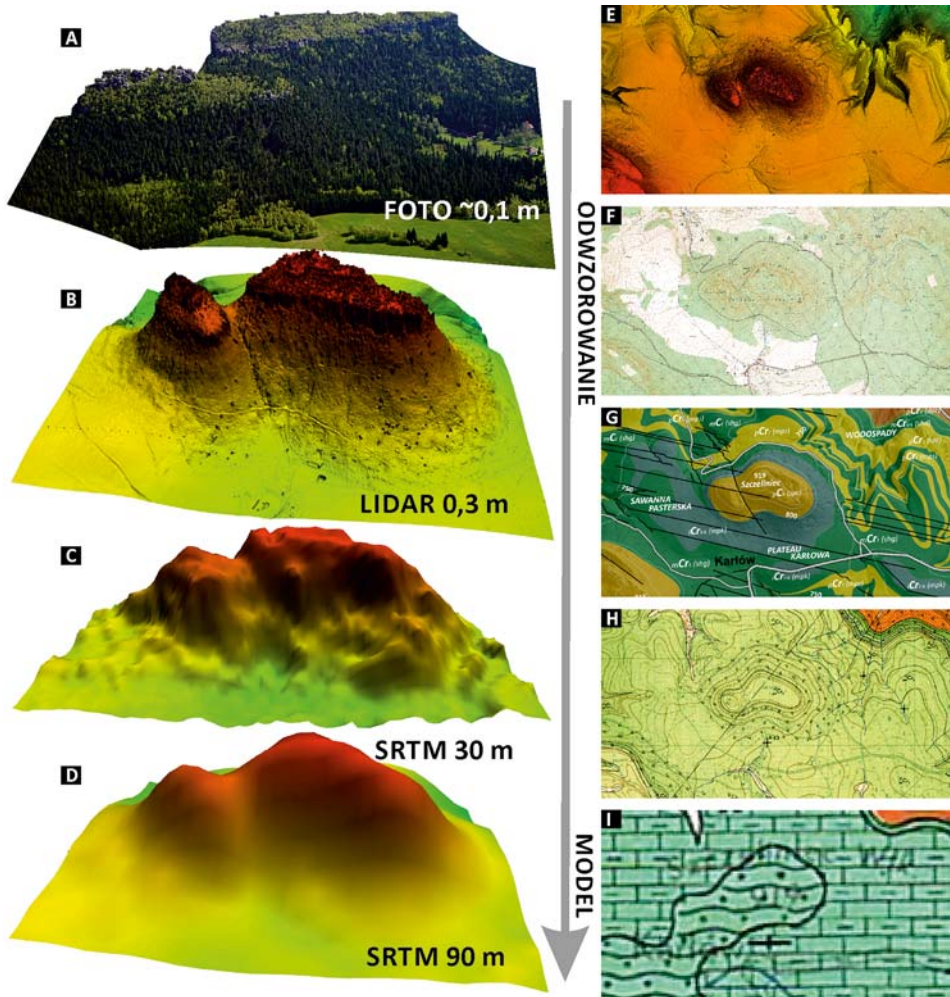
o ile na mapie szczegółowej można zaznaczyć jakiś charakterystyczny punkt terenu, jak pojedyncze drzewo, czy skałę, o tyle mapie w dużej skali możemy co najwyżej określić ogólny charakter pokrywy roślinnej albo jej brak, lub ogólną litologię czy wiek skał budujących powierzchnię terenu. W zasadzie, bez dodatkowych informacji i atrybutów, mapy geologiczne przeglądowe na ogół nie pozwalają wprost na wnioskowanie o charakterze innych powierzchni geologicznych niż powierzchnia terenu.

Wyjątek od przedstawionych wyżej zasad stanowią *mapy tematyczne*, które bez względu na skalę mają czysto funkcjonalne znaczenie. Dobrym przykładem są np. Szczegółowa Mapa Geologiczno-Środowiskowa Polski, jak również Mapa Hydrogeologiczna Polski w skali 1: 50 000. Pierwsza, przedstawia wynikowe, potencjalne uwarunkowania użytkowania danego terenu, na które składa się m.in. pokrycie terenu, wyłączenia administracyjne i kulturowe, geozagrożenia osuwiskowe i powodziowe oraz inne właściwości, które nie są efektem odwzorowania jako takiego, lecz modelowania. Druga natomiast odwzorowuje m.in. ciśnienia wód podziemnych, które rzadko są **powierzchniami fizycznymi** tychże, a najczęściej **abstrakcyjnymi powierzchniami modelowymi**. Podobnie jak abstrakcyjne i modelowe są bilansowe kierunki przepływu wód podziemnych, które z tych map wynikają.

W ostatnich latach rozpowszechniły się na dużą skalę metody pośredniego i zdalnego odwzorowywania przestrzeni geologicznej. Dotyczy to z jednej strony coraz lepszego i głębszego rozpoznania budowy geologicznej za pomocą *metod geofizycznych* (sejsmika, metody geoelektryczne, elektromagnetyczne, grawimetryczne), które sukcesywnie obejmują coraz większe obszary Ziemi, w tym oceanów. W przypadku metod geofizycznych informacje o wszelkich **fizycznych powierzchniach nieciągłości** stanowią podstawę do tworzenia trójwymiarowych modeli przestrzeni geologicznej. Stopniowo poprawiała się jakość odwzorowania powierzchni terenu od tradycyjnych metod *geodezyjnych*, poprzez *fotogrametrię*, *geodezję satelitarną*, satelitarne *odwzorowania radarowe* (SRTM), *zdalny skanning laserowy* (ALS, LiDAR), *naziemny skanning laserowy* (TLS), czy *echosondowanie*, pozwalają obecnie z dużą rozdzielczością i na dużą skalę odwzorowywać *kształt powierzchni* terenu (Ziemi) i tworzyć 3-D modele w dowolnej skali. Przykłady na ilustracji (il. 2) ukazują wybrane zastosowania ww. metod dla odwzorowania/modelowania powierzchni terenu i jej budowy geologicznej w różnej skali.

Powierzchnie materialne, geometryczne i abstrakcyjne

Powierzchnie w geologii mają różny charakter. Mogą wyznaczać granice realnych, materialnych obiektów geologicznych (**powierzchnie materialne**), mogą wyznaczać granice materii o różniących się atrybutach, np. stanie lub rodzaju



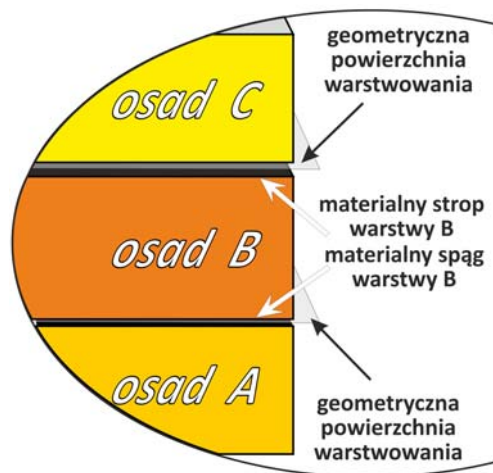
II. 2. Przykłady odwzorowań oraz modeli powierzchni terenu i budowy geologicznej okolic Szczelińca (Góry Stołowe) w zależności od skali.

A – fotografia lotnicza (autorka: B. Schutty); B – obraz/wizualizacja przestrzenna wykonana z numerycznego modelu powierzchni terenu (NMPT) LiDAR; C – wizualizacja wykonana z NMPT SRTM 30 (XXI w.); D – wizualizacja wykonana z NMPT SRTM 90 (lata 90. XX w.); E – NMPT LiDAR; F – Szczegółowa Mapa Topograficzna Polski (SMTP) '92, 1: 10 000 (ark. Karlów); G – autorska mapa geologiczna obszaru Parku Narodowego Gór Stołowych '2010, 1: 10 000 na podkładzie NMPT LiDAR (Wojewoda, 2011); H – Szczegółowa Mapa Geologiczna Sudetów (SMGS), 1: 25 000; I – Mapa Geologiczna Polski (MGP) '92, 1: 200 000

materii (**powierzchnie geometryczne**), mogą wreszcie stanowić odwzorowanie lub model przestrzenny wybranej cechy ośrodka geologicznego lub kombinacji cech, zwykle o charakterze umownym, często wręcz arbitralnym (**powierzchnie abstrakcyjne**). Nie sposób w całości omówić wszystkie możliwe sytuacje, jakie

występują w geologii. Jedno jest pewne – prawidłowe rozpoznanie charakteru powierzchni lub trafne jej zdefiniowanie, ma znaczenie zasadnicze dla przyjęcia właściwej metody badawczej – opisu i interpretacji. Ma to również bezpośrednie przełożenie na czysto aplikacyjne, praktyczne skutki przyrodnicze, gospodarcze i społeczne. Zatem kilka przykładów.

Jedną z pierwszych cech skał wszelkiego rodzaju, która była postrzegana od dawna przez niemal wszystkich ludzi, i która do dzisiaj inspiruje nie tylko geologów, jest ich *warstwowanie*. Przejawia się ono mniej lub bardziej równoległymi lub współkształtnymi powierzchniami, które występują w skałach tego samego rodzaju lub oddzielają od siebie skały różne – *warstwy*. Te geometryczne powierzchnie zwane są potocznie **powierzchniami warstwowania** (il. 3). Warstwowanie dotyczy przestrzeni geologicznej w różnej skali. Przykładem najbardziej powszechnym jest warstwowanie w osadach i skałach osadowych, które stanowi zapis *sedymencji*, czyli *erozji*, *transportu* i *depozycji* osadów w określonym miejscu, np. na dnie mo-



II. 3. Powierzchnie materialne i geometryczne w skałi lokalnej i regionalnej (warstwowania skał)

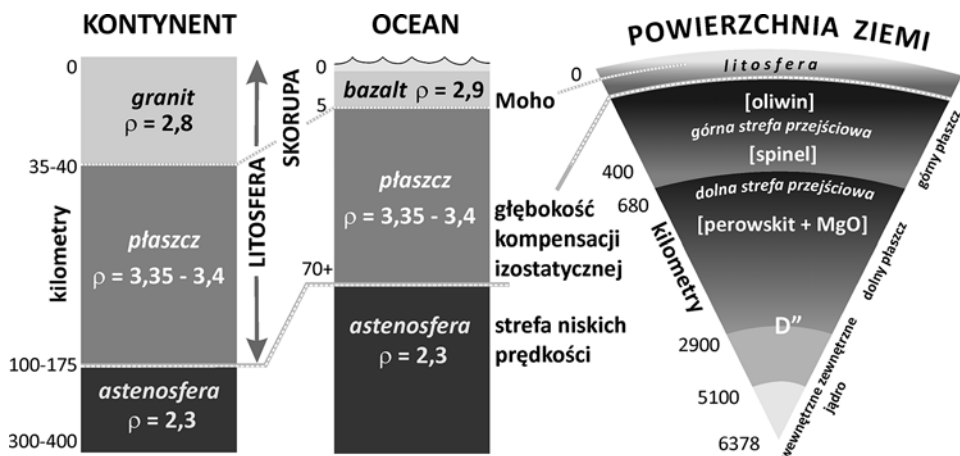
rza, jeziora, na pustyni czy w podłożu lądolodu. Każdy epizod lub okres depozycji skutkuje nagromadzeniem materiału o ściśle określonych właściwościach, które są efektem sposobu sedymencji, czyli *procesu sedymencji*. Tak właśnie definiuje się w geologii warstwy osadu. Każda zmiana procesu sedymencji skutkuje zmianą cech osadu, co w przypadku osadów kopalnych (skał osadowych) daje podstawę do wnioskowania nt. procesów sedymencji w przeszłości. W szczególności daje możliwość określenia takich parametrów, jak: sposób sedymencji, tempo depozycji oraz charakter zmian tychże w czasie (np. sedymencja ciągła, rytmiczna, cykliczna, wydarzeniowa, por. Wojewoda, 2015). Układ warstw pozwala również na określenie, czy depozycja materiału następowała na powierzchni poziomej

(*warstwowania poziome*), czy nachylonej (*warstwowania nachylone*), co ma z kolei zasadnicze znaczenie w rekonstrukcjach dawnej (pierwotnej) przestrzeni geologicznej (por. dalej, zagadnienie pionu). W trakcie wnioskowania o niej oraz o zachodzących w przeszłości procesach sedymentacji obowiązuje przesłanka „aktualizmu geologicznego”, która jest metodycznym przeniesieniem na grunt geologii zasady *uniformizmu przyrodniczego*.

Powracając do warstwowania, sens i znaczenie poszczególnych jego elementów pokazuje ilustracja (**il. 3**). Każda warstwa osadu posiada dwie ograniczające ją powierzchnie – *spąg* i *strop*. Początkowo pojęcia te odnosiły się do kopalni (np. pokładów węgla, soli, rudy) i oznaczały odpowiednio dolną i górną granicę pokładu. Obecnie są nieco inaczej pojmowane. Spąg warstwy jest **materialną powierzchnią** przynależną do warstwy, która wyznacza zasięg najstarszego osadu w jej obrębie. Wyznacza zatem początek konkretnego procesu sedymentacji i ma zawsze charakter **powierzchni depozycyjnej**. Podobnie, strop warstwy wyznacza zasięg najmłodszego osadu w jej obrębie. Przy czym nie oznacza to, że jest to najmłodszy osad reprezentujący przypisany warstwie proces sedymentacji, gdyż może to być **powierzchnia erozyjna**, zapisująca „ubytek” materiału w danym miejscu po uprzedniej jego depozycji. Prawidłowe rozpoznanie charakteru powierzchni stropowych warstw ma zasadnicze znaczenie dla rekonstrukcji przebiegu sedymentacji w czasie (por. Wojewoda 2015). Jest jasne, że zasięg warstw ogranicza się do obszaru, na którym odbywała się sedymentacja, zatem ich rozmiary są również ograniczone, co w praktyce oznacza, że założona wcześniej równoległość, czy współkształtność ich stropu i spągu warstwy może być rozważana tylko na stosunkowo niewielkim obszarze. Wyklucza to również ich płaski kształt (por. dalej).

Kolejny przykład odnosi się do **powierzchni globalnych**, czyli takich, których występowanie i zasięg wyznacza strukturę Ziemi jako planety. Te najbardziej rozpoznawalne to oczywiście fizyczne **powierzchnie terenu** na obszarach lądowych kontynentów i powierzchnia wody (lodu) na obszarach oceanicznych. Informacje o budowie wnętrza Ziemi uzyskujemy bezpośrednio z rdzeni wiertniczych głębokich wierceń, przy czym głębokości te nie przekroczyły dotychczas granicy ok. 13 km. Przykładowo, słynny odwiert „do piekła” SG-3 na Półwyspie Kolskim wykonany w latach 1970–2008 osiągnął największą dotychczas głębokość 12 262 m. W porównaniu z głębokościami podanymi na ilustracji 4 to zaledwie drobne zadrapanie w skorupie kontynentalnej. Informacji ze znacznie większych głębokości, bo sięgających nawet kilkuset km, dostarczają *ksenolity* – fragmenty skał wyniesione do powierzchni w strumieniach magmy wypływającej na powierzchnię lub zastygłej tuż pod powierzchnią Ziemi, a pochodzących z pogranicza *plaszcz*a i *astenosfery* (**il. 4**) (Anderson, Natland, 2005).

Nasza wiedza o strukturze Ziemi pochodzi z pośrednich przesłanek, jakich głównie dostarczają badania geofizyczne. W pierwszej kolejności dotyczy to granic



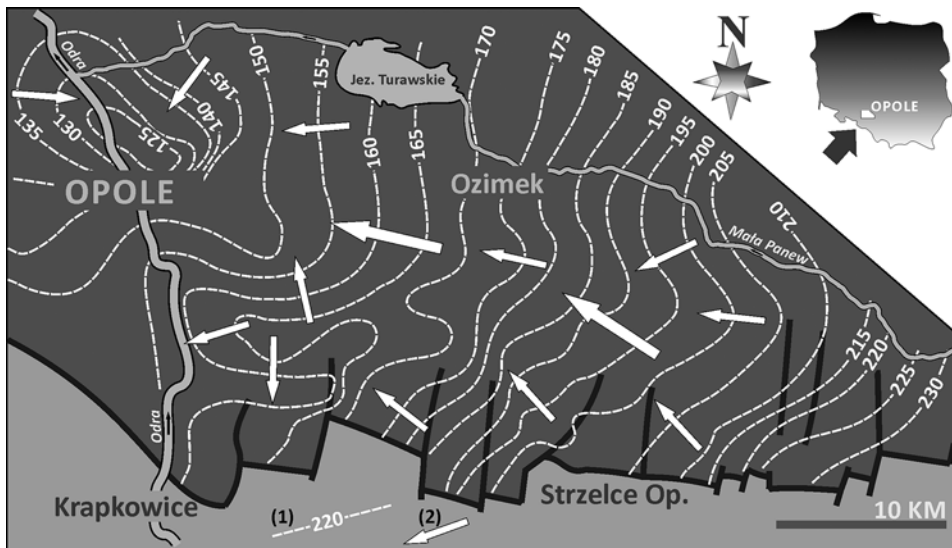
II. 4. Powierzchnie materiałne i geometryczne w skali globalnej, planetarnej (wg Anderson 1989, 2007; Angevine i inni, 1990; Burns 1993, zmienione).

między najważniejszymi fragmentami ziemskiej *litosfery*, której odmienny skład i struktura na współczesnych kontynentach i oceanach były jednym z pierwszych najważniejszych odkryć globalnej geologii (il. 4). Dzisiaj wiemy na ten temat znacznie więcej, chociażby dlatego, że jej najbardziej zewnętrzna „warstwa”, czyli *skorupa ziemska* pozostaje w zasięgu bezpośredniego rozpoznania. Skorupa kontynentalna zbudowana jest w przewadze ze skał osadowych, magmowych i metamorficznych o dużej zawartości krzemionki („kwaśnych”, „obojętnych”). Potocznie nazywana jest „skorupą granitową” i ma przeciętną gęstość ok. $2,8 \text{ g/cm}^3$. Tymczasem skorupa oceaniczna ma nieco większą gęstość (ok. $2,9 \text{ g/cm}^3$) i zbudowana jest niemal wyłącznie ze bazaltoidów i serpentynitów, skał ubogich lub pozbawionych krzemionki („zasadowych”). Skład mineralny tej ostatniej znamy z wierceń podmorskich, ale nie tylko – lokalnie skały den oceanicznych wystają ponad powierzchnię wody tworząc wyspy i archipelagi również dostępne do bezpośrednich badań (Wyspy Kanaryjskie, Islandia, Hawaje i inne). Dolną „warstwę” ziemskiej litosfery stanowi *płaszcz* o znacznie większej gęstości od skorupy (ok. $3,4 \text{ g/cm}^3$). Płaszcz zbudowany jest w przewadze z glinokrzemianów, które budują skały określane ogólnie jako *perydotyty*. Granicę między skorupą a górnym płaszczem wyznacza odkryta w 1909 r. przez chorwackiego sejsmologa Andrija Mohorovičića tzw. **powierzchnia Moho**. Powierzchnia ta jest *de facto* strefą, w której następuje radykalna zmiana właściwości sprężystych skał, co przejawia się wyraźną zmianą prędkości fal sejsmicznych w ośrodkach skalnych, które rozdziela. Nie jest to materiałna powierzchnia geologiczna, lecz granica geometryczna rozdzielająca ośrodki skalne o różnych zachowaniach reologicznych. Podobne granice/powierzchnie geologiczne występują również głębiej w płaszczu. Tzw. *górna granica przejściowa* jest również powierzchnią geometryczną i też rozdziela dwa ośrodki skalne o różnych gęstościach – *górną płaszcz* od podścielającej

go *astenosfery* (il. 4). Jak można zauważyć, użyto wyżej sformułowań „warstwa” oraz „strefa”. Zarówno skorupa, płaszcz, jak i strefy przejściowe spełniają definicję warstwy, gdyż są to przestrzenie ograniczone współkształtnymi powierzchniami granicznymi, jednak w żadnym wypadku nie można tu mówić o powierzchniach płaskich (por. dalej)...

Powierzchnie abstrakcyjne stanowią kwintesencję procedury modelowania. Mało, że nie są materialne, to ich kształt określa wyłącznie ludzki umysł, który próbuje tworzyć przydatne i łatwo przyswajalne analogi... geometryczne, czasem materialne. Przykładem może być poziomicowy model powierzchni terenu – poziomice są całkowicie abstrakcyjnymi liniami, gdyż z definicji powinny stanowić wspólny iloczyn zbioru punktów materialnych (powierzchnia terenu) i geometrycznych (tworzących **powierzchnie poziome na różnych wysokościach**). Są to dwa rozdzielne zbiory/byty ontologiczne, które z założenia nie mogą mieć elementów wspólnych. Tak więc albo uznamy, że poziomice nie ma, albo przyjmujemy praktyczną/użyteczną zasadę, że materialna powierzchnia posiada swoje geometryczne odwzorowanie/model, jakże przydatny dla modelowania (por. il. 2 B–F).

Innym przykładem powierzchni abstrakcyjnych w geologii mogą być modele pokazujące zmienność przestrzenną wartości jakiejś cechy/stanu na określonym obszarze Ziemi (ponad, na i pod powierzchnią terenu), np. temperatury powietrza (*izoterm*), grubości pokrywy śnieżnej (*izochiony*), czy ciśnienia hydrostatycznego w warstwie wodonośnej o napiętym zwierciadle wody (*hydroizopiezy*)



II. 5. Przykład abstrakcyjnej powierzchni fizycznej – ciśnienie wody w warstwie wodonośnej o napiętym zwierciadle wody, środkowy trias, Opolszczyzna (wg Kryza i Staško 2000, zmienione)
1 – hydroizopiezy (linie jednakowego ciśnienia wody podziemnej [m n.p.m.]; 2 – strzałki pokazujące przypuszczalne kierunki przepływu wody podziemnej wynikające z różnicy ciśnienia

(il. 5). Ale również mogą to być abstrakcyjne modele procesów, które zachodzą na danym obszarze, i to zarówno ich kierunku, jak i natężenia, np. natężenia pola magnetycznego (*izodynamy*), opadów deszczu (*izohiety*) czy trzęsień ziemi (*izosejsmy*). Warto tutaj wspomnieć, że pierwszej próby wykonania *modelu trzęsienia ziemi* na terenach niegdyś polskich dokonał Feliks Kreutz, zasłużony dla rozwoju geologii polskiej badacz, profesor Uniwersytetu Jana Kazimierza we Lwowie, później m.in. rektor Uniwersytetu Jagiellońskiego. Zainspirowany opracowaniem R. Malleta (1862) dotyczącym trzęsienia ziemi w Neapolu w roku 1857, stworzył pierwszą symulację układu izosejsm dla trzęsienia ziemi, jakie wystąpiło 17 sierpnia 1875 roku we Wschodniej Galicji, niegdyś ziemiach polskich (Kreutz 1876).

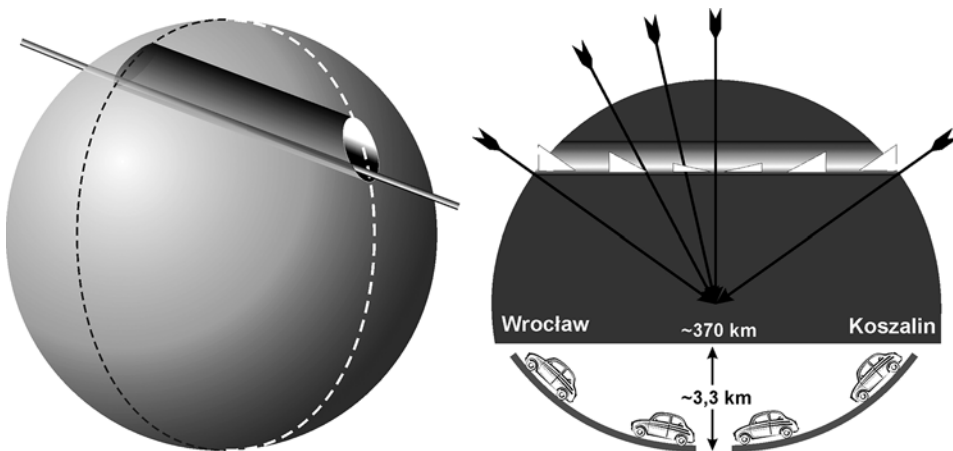
Pion i poziom – pojęcia geometryczne czy fizyczne, a może fizjologiczne?

Zagadnienie **pionu** jest ściśle związane z **masą** i oddziaływaniem grawitacyjnym, a co za tym idzie z **siłą ciężkości**. Tym samym, w warunkach ziemskich pion stanowi najważniejszy parametr wyznaczający **przestrzeń geologiczną**, czyli przestrzeń, w której zachodzą wszystkie **procesy geologiczne** oraz występują wszystkie **zjawiska geologiczne** (por. Wojewoda 2015). Pion, jako wyznacznik orientujący przestrzeń geologiczną, jest linią prostą, czyli stanowi **pojęcie geometryczne**. Ale definicja pionu jest ściśle fizykalna, gdyż jest to **linia łącząca konkretny punkt na powierzchni Ziemi lub w jej pobliżu ze środkiem masy Ziemi**, która pokrywa się z kierunkiem działania siły ciężkości w tym miejscu. Zatem, pion jest również **pojęciem fizycznym**. O ile pion jest pojęciem **pierwotnym**, o tyle **poziom** jest pojęciem **pochodnym** (wtórnym). Jest definiowany, jako płaszczyzna prostopadła do kierunku działania siły ciężkości na powierzchni Ziemi lub w jej pobliżu, w konkretnym miejscu, czyli do pionu.

Obydwie przedstawione definicje sprawiają, że zarówno pion, jak i poziom w każdym miejscu Ziemi są cechami właściwymi i zlokalizowanymi. Gdyby Ziemia była idealną, jednorodną i całkowicie bezwładną kulą, wtedy jej powierzchnia byłaby sferą, a pion w każdym punkcie Ziemi i poza nią przechodziłby przez geometryczny środek naszej planety. Tak jednak nie jest. Po pierwsze dlatego, że Ziemia obraca się wokół własnej osi, co wywołuje efekt siły odśrodkowej i **elipsoidalne odkształcenie** jej powierzchni, po drugie wokół Ziemi krąży księżyc, co wywołuje efekt pływowy i **falowe odkształcenie** powierzchni, wreszcie Ziemia nie jest jednorodnym obiektem, co wynika z nierównomiernego rozmieszczenia masy np. w litosferze, co przejawia się chociażby **rozmieszczeniem oceanów** i **kontynentów** na jej powierzchni (por. il. 4). Wszystkie te przyczyny sprawiają,

że powierzchnię Ziemi najlepiej modeluje **geoida**, która jest nieco zniekształconą elipsoidą obrotową. To właśnie geoida jest powierzchnią w każdym punkcie prostopadłą do pionu, natomiast wszelkie odstępstwa kierunku działania siły grawitacji od pionu stanowią podstawę o wnioskowaniu nt. przyczyn wpływających na kształt geoidy. Na ocenie i interpretacji przyczyn anomalii grawitacyjnych opiera się szeroko stosowana w geologii metoda **grawimetryczna**.

Przedstawione wyżej rozważania odpowiadają w pewnym zakresie na pytanie, czy istnieją **ziemskie materialne linie proste**? W małej, lokalnej skali pewnie tak. Nie można zaprzeczyć, że krawędzie kryształów, ślady po ucieczce gazu lub kanał po wygrzebującym się zwierzęciu z osadu, narastający na stropie jaskini stalaktyt, czy zasypany osadem lub skamieniały korzeń rośliny, bardzo często tworzy geologiczną **materialną strukturę liniową**. Na ogół struktury takie są znakomitymi wskaźnikami dawnego pionu (paleopionu), a nawet kierunku góra–dół (por. **il. 21**, Wojewoda 2015). Jednak odpowiedź dla przestrzeni geologicznej w skali ponadlokalnej, globalnej brzmi – zdecydowanie nie! Z prostej przyczyny – prostoliniowość, jako taka, nie jest cechą naturalną dla przestrzeni geologicznej. Większość procesów geologicznych zachodzi pod/na/pomad różnie definiowanymi powierzchniami ziemskimi, wręcz je cały czas kształtując na wszelkie możliwe sposoby, a znacznie rzadsze są procesy międzywarstwowe. To naturalna cecha powierzchni ekwipotencjalnych, zarówno tych fazowych, jak i materiałowych, a takimi w przewadze są ziemskie sfery (*geosfery*). Istotę nieprostoliniowości przestrzeni geologicznej przedstawia ilustracja 6, która ukazuje, że nawet gdybyśmy chcieli przejechać wzdłuż linii prostej z Wrocławia do Koszalina (ok. 370 km), to i tak musielibyśmy pokonać, wcale „nieprostą pułapkę” grawitacyjną o głębokości blisko 3,3 km (**il. 6**)...



Il. 6. Schemat ukazujący istotę nieprostoliniowości przestrzeni geologicznej w skali regionalnej

Czy istnieją płaskie powierzchnie geologiczne?

Przedstawione w poprzednich rozdziałach argumenty pozwalają już na wstępie postawić tezę, że **płaskie materialne powierzchnie geologiczne w dużej skali nie występują**. A dzieje się tak głównie za sprawą planetarnych i astronomicznych procesów kształtujących planetę, w których dominującą rolę odgrywa z jednej strony grawitacja, z drugiej natomiast dynamika układu słonecznego. Również procesy termodynamiczne we wnętrzu Ziemi ściśle nawiązują do (wynikają ze?) sferycznej struktury naszej planety. Nie wyklucza to możliwości formowania się płaskich powierzchni geologicznych w małej skali, które mogą powstawać wszędzie tam, gdzie w tworzeniu się materii i przestrzeni geologicznej przeważają procesy niezależne od wyżej wymienionych. Jedynym przykładem procesu, który z definicji tworzy powierzchnie płaskie, jest krystalizacja i związane z nią powierzchnie kryształów. Mogą to być również procesy tektoniczne i ich skutki – płaskie powierzchnie zniszczeń w małej i średniej skali (np. spękania ciosowe, uskoki), procesy sedymentacji i ich produkty – płaskie powierzchnie sedymentacyjne (np. warstwowanie, powierzchnie erozyjne), czy procesy metamorficzne o mieszanym charakterze i związane z nimi płaskie powierzchnie ścinania oraz rekrytalizacji (np. foliacja).

Ale również i te procesy rzadko skutkują płaskimi powierzchniami geologicznymi. Zatem skoro „niepłaskie” to jakie? Odpowiedź na takie pytanie wcale nie jest trywialna. Jedną z możliwych ścieżek poszukiwania odpowiedzi jest wskazanie możliwie ogólnych uwarunkowań przestrzennych i fizycznych dla tworzenia się przestrzeni geologicznej oraz możliwych scenariuszy uzyskiwania przez nią stanu okresowej (quasi) równowagi. Jednocześnie jednak, konieczne jest podejście fenomenologiczne, czyli wskazanie realnych zjawisk, które spełniają oczekiwane uwarunkowania.

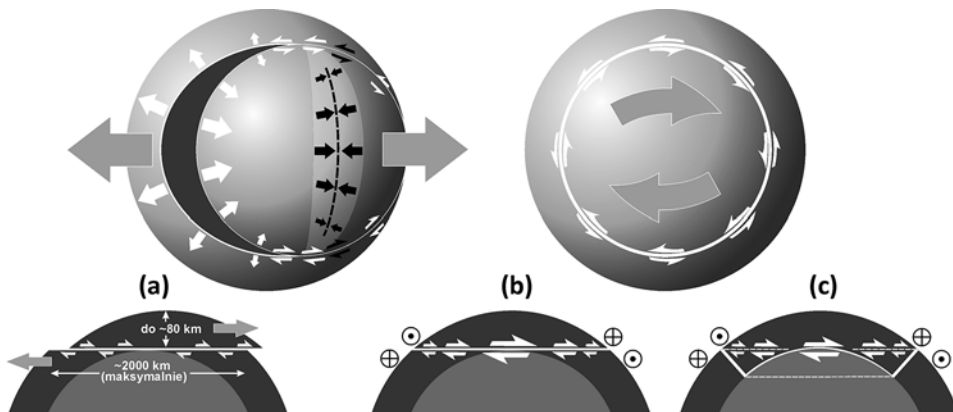
Aby dalsze rozważania mogły dotyczyć również dzisiejszej przestrzeni geologicznej, musimy pominąć ewentualny wpływ na nią zmian ewolucyjnych o charakterze planetarnym i astronomicznym, których wymiar czasowy jest nadrzędny w stosunku do współczesnych procesów geologicznych. Zatem przyjmijmy, że Ziemia w przeszłości stanowiła i obecnie stanowi w przybliżeniu **obiekt o stałych parametrach**, oczywiście w skali czasu kolejnych okresów geologicznych. Jest to o tyle uzasadnione, że takie jest właśnie kryterium taksonomiczne podziału wieku Ziemi na etapy (por. Wojewoda, 2015). A oto czym skutkują powyższe założenia...

Po pierwsze, jak już wspomniano, większość procesów geologicznych zachodzi w obrębie przestrzeni geologicznej, której struktura jest warstwowo-sferyczna i z definicji narzuca ograniczenia z tym związane. Jednym z najważniejszych zagadnień kinematycznych jest zagadnienie ruchu oraz transportu w takiej przestrzeni. Każde przemieszczenie materii wzdłuż linii prostej z definicji musi naruszać/przecinać granice współkształtnych granic przestrzeni geologicznej. Tymczasem

tak się nie dzieje, a odstępstwa dotyczą stosunkowo rzadkich sytuacji, kiedy ruch odbywa się w przybliżeniu równoległe do siły grawitacji i prostopadle do powierzchni geosfer (np. diapiryzm, wulkanizm). Oznacza to, że większość procesów związanych z ruchem realizuje się albo **na powierzchni sfer**, albo **we wnętrzu warstw** sferycznych.

Pierwszy przykład dobrze ilustruje sytuacja „wędrówki na wprost” po powierzchni ziemi, która *de facto* oznacza wędrówkę po jednym z możliwych okręgów/obwodów Ziemi, i która kończy się w miejscu jej rozpoczęcia. Mechanizm taki w pewnym zakresie odnosi się również do względnej rotacji jądra i płaszczki Ziemi, co m.in. skutkuje polaryzacją magnetyczną całej planety.

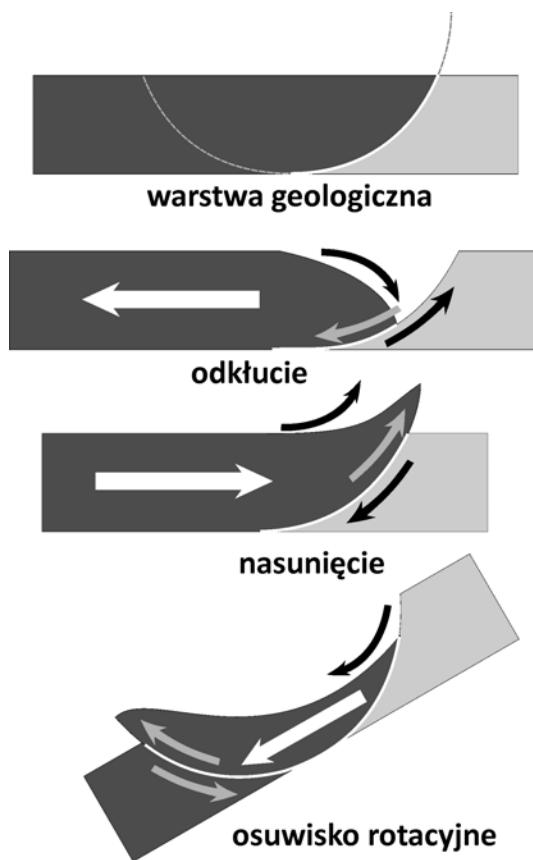
Drugi przykład dobrze ilustrują **powierzchnie uskokowe**. Te płaskie mogą być albo tylko pionowe lub stożkowe (*rozłamy*) i wtedy z definicji może na nich dochodzić tylko do względnych poziomych przemieszczeń (*uskoki przesuwowe*), albo mogą być bardzo niskokątowe lub poziome i wtedy z definicji muszą w przekroju z powierzchnią Ziemi tworzyć zamkniętą linię przekrojową o zasięgu nieprzekraczającym 3700 km przy grubości skorupy ziemskiej ok. 33 km (il. 7). Względne przemieszczenia wzdłuż takiej powierzchni mogą być rotacyjne, jak i lokalnie translacyjne (*nasunięcia, odkłucia*).



Il. 7. Różne możliwości realizacji ruchu mas ziemskich w skali globalnej: odkłucie i translacja (lub rotacja) wzdłuż niskokątowej powierzchni płaskiej (a); rotacja wzdłuż powierzchni płaskiej (b); translacja i rotacja wzdłuż powierzchni pionowych i stożkowych (c)

Gdy powierzchnie nie są płaskie, wtedy może wzdłuż nich dochodzić do różnych przemieszczeń, jednak na znacznie mniejszą skalę. W każdym przypadku ruch punktów odbywa się wzdłuż **trajektorii krzywoliniowych** (kolistych, eliptycznych), a przemieszczeniom brył towarzyszy **transformacja ruchu translacyjnego w rotacyjny** (il. 8). Dobrym przykładem tych zjawisk procesów mogą być głębokie rozłamy śródkontynentalne (*intrakratoniczne*), czy *uskoki transformujące*

na obszarach oceanicznych, ale również tzw. *osuwiska rotacyjne* powszechnie spotykane na niestatecznych zboczach wyrobisk, nasypów oraz na obszarach górskich (il. 8). Z kolei najlepszym modelem ilustrującym jak kształt powierzchni wymusza transformację ruchu translacyjnego w rotacyjny i odwrotnie, jest zwykła śruba lub np. niezwykle użyteczny przyrząd, jakim jest zwykły korkociąg (czytaj dalej)...



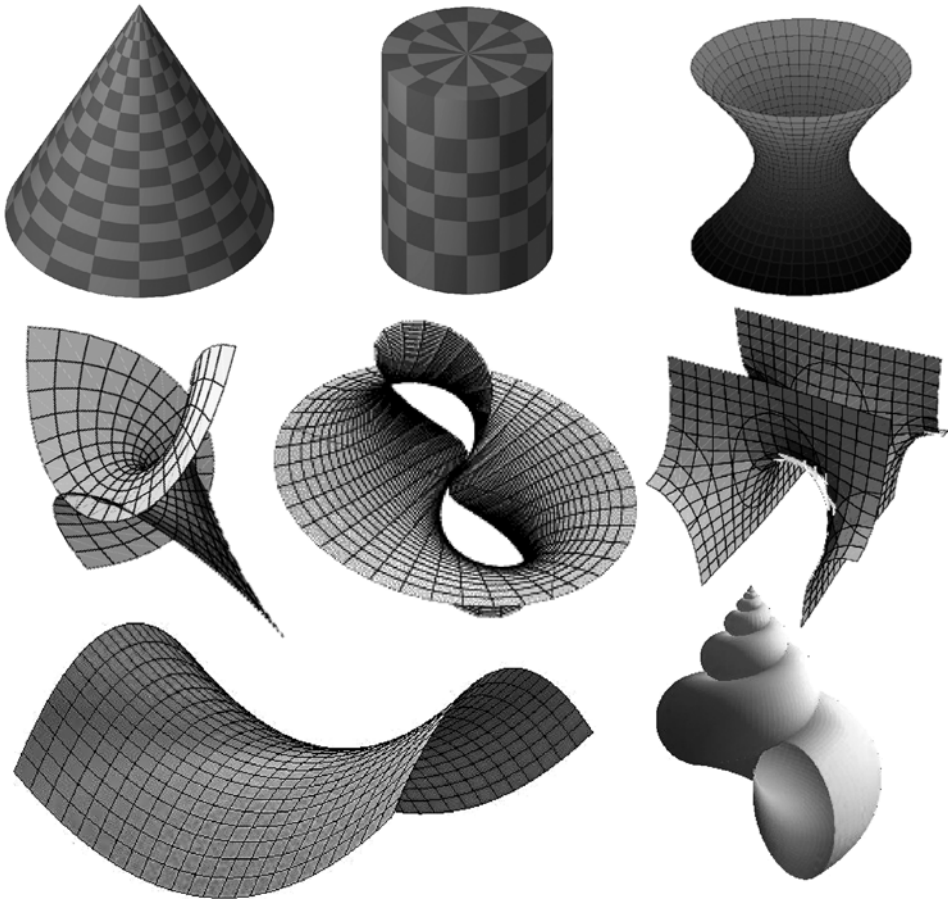
Il. 8. Schematyczne modele różnych możliwości transformacji ruchu translacyjnego w rotację

Jak nie płaskie, to jakie i dlaczego?

Jak może wynikać z przedstawionych wcześniej argumentów, nie należy się spodziewać, że płaskie powierzchnie geologiczne występują tak powszechnie, jak by się mogło z pozoru wydawać. Powstaje jednak pytanie – jakie zatem najczęściej są te powierzchnie i dlaczego? Na drugą część pytania po części odpowiadają przytoczone reguły wynikające z zasad geometrii. Z jednej strony sferyczno-kulista

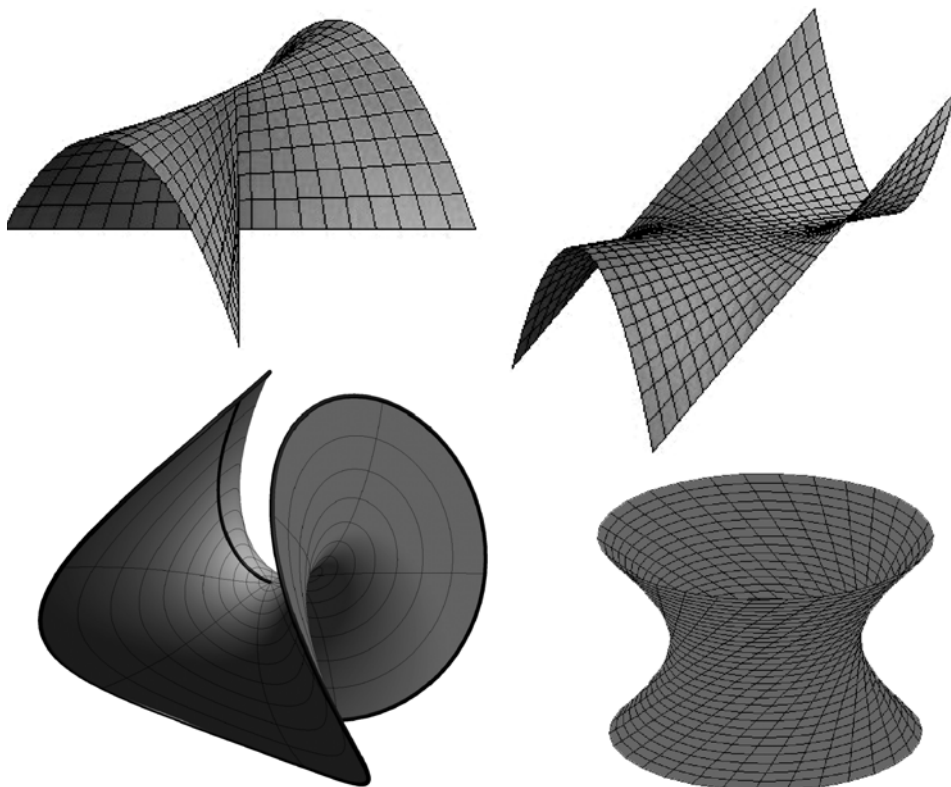
struktura Ziemi i konieczność jej zachowania wskutek m.in. radialnie działającej siły ciężkości i rozmieszczenia materii ziemskiej, z drugiej prostopadłościowy charakter ruchu bezwładnego i płaszczyznowy charakter translacji, wymuszające konieczność transformacji i dopasowania zasad kinematyki do linii i powierzchni zakrzywionych. Na pierwszą część pytania nie można udzielić jednoznacznej odpowiedzi, gdyż wielość procesów i kontekstów geologicznych i nie jest określona. Można jednak dokonać pewnej próby generalizacji tego zagadnienia.

Zarówno płaszczyzna, jak i sfera należą do tej samej kategorii powierzchni (są sobie równoważne), które ogólnie określamy jako **powierzchnie minimalne (il. 9)** Zgodnie z definicją (*mat.*), są to **powierzchnie, które w każdym punkcie mają średnią krzywiznę równą zero** (wszystkie jej punkty są punktami siodłowymi). Bezpośrednią implikacją tej definicji jest to, że każdy punkt na powierzchni minimalnej jest punktem siodła o równych i przeciwnych krzywiznach głów-



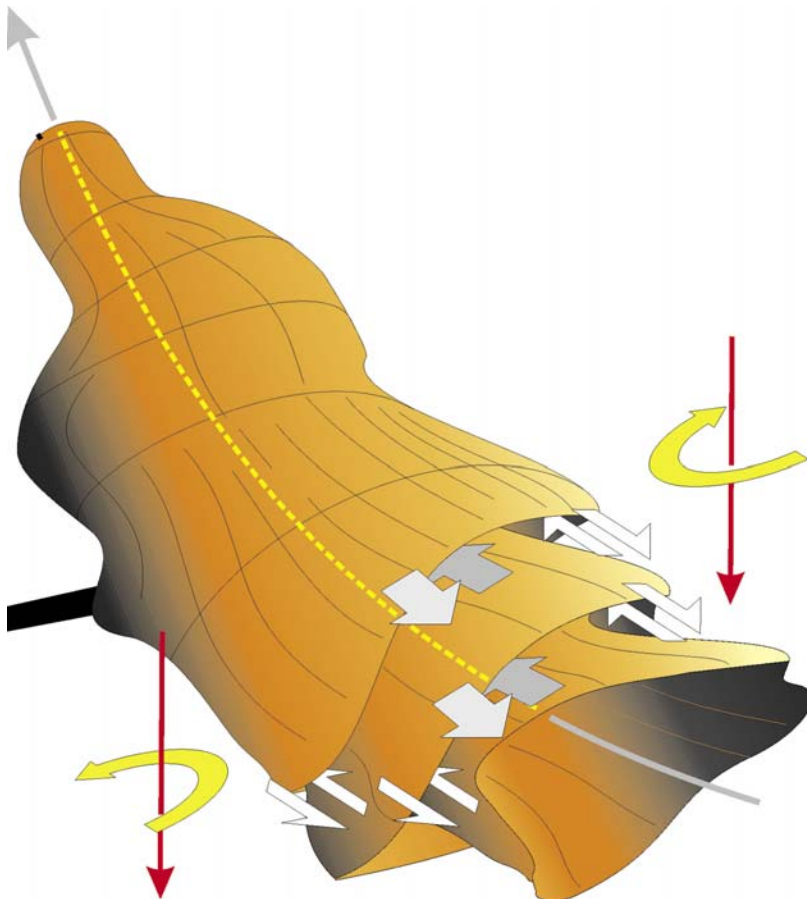
II. 9. Przykłady (modele graficzne) różnych powierzchni minimalnych

nych, czyli gdy jej średnia krzywizna zanika identycznie. Zatem m.in. to je łączy, że punkt na sferze możemy uznać za równoważny punkt płaszczyzny stycznej w tym miejscu do sfery, co ma praktyczne znaczenie w konwersji przestrzeni sferycznej na płaską i odwrotnie. Cechą łączącą te powierzchnie jest to, że rozdzielają (tną) przestrzeń na dwie części, a granica między nimi spełnia kryterium minimum. Inną ich cechą jest to, że są najmniejszymi powierzchniami, które ograniczają możliwie największą ilość np. materii (**powierzchnie ekwipotencjalne**), jak w przypadku kul cieczy o dużej gęstości/lepkości w cieczy mniej gęstej/lepkiej. Szerzej ujmując, właściwość ta nosi nazwę „definicji energetycznej”, wg której tzw. *zanurzenie współkształtne* $X: M \rightarrow R^3$ jest minimalne wtedy i tylko wtedy, gdy jest punktem krytycznym energii Dirichleta dla wszystkich zwartych wariacji lub jeśli każdy punkt $p \in m$ ma sąsiedztwo o najmniejszej energii w stosunku do jego granicy. Co w wielkim uproszczeniu nazywane jest w geologii **granicami/układami stabilnymi** (*stacjonarnymi, statecznymi*). W przypadku fizycznych powierzchni minimalnych warto podkreślić jeszcze jedną ich cechę – przemieszczenie/translacja równoległe do takich powierzchni wymaga minimalnej energii, podczas gdy ruch w kierunku poprzecznym do nich jest co najmniej utrudniony, jeśli nie niemożliwy...



II. 10. Przykłady (modele graficzne) powierzchni prostokreślnych

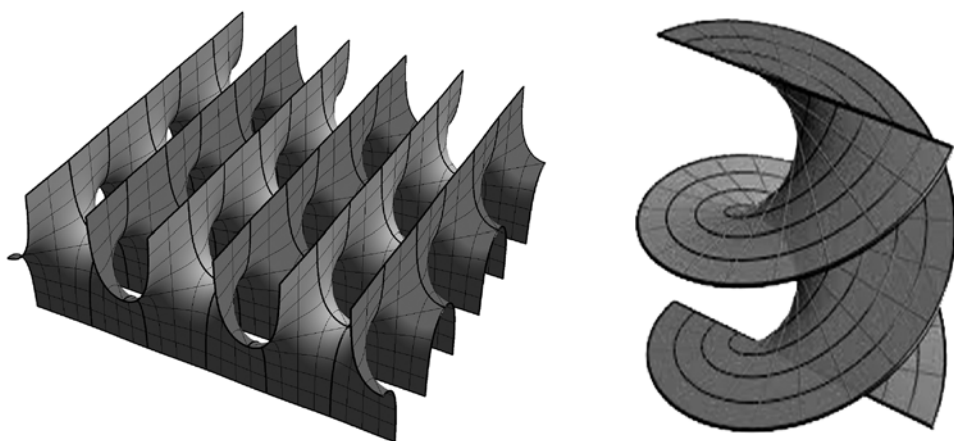
Inną kategorią niezwykle ciekawych powierzchni są tzw. **powierzchnie prostokreślne**. Powierzchnię taką parametryzuje następujący zapis: $\chi(u, v) = \beta(u) + v\delta(u)$, gdzie β i δ są krzywymi. Powierzchnię tworzą proste wychodzące z krzywej $\beta(u)$ w kierunku $\delta(u)$. Krzywa $\beta(u)$ jest nazywana *kierownicą*, natomiast prosta o kierunku $\delta(u)$ to *tworząca*. W potocznym rozumieniu są to **powierzchnie, przez których każdy punkt przechodzi prosta, nazywana jej tworzącą, która zawiera się w tej powierzchni**. Zgodnie z powyższym płaszczyzna jest również powierzchnią prostokreślną, chociaż specyficzną, nietypową. Najbardziej znane powierzchnie prostokreślne to *powierzchnie stożkowe, walcowe* oraz *paraboloida hiperboliczna, hiperboloida jednopowłokowa, powierzchnia Ennepera, konoida* oraz *helikoida* (il. 10). Powierzchnie te tak powszechnie występują wokół nas, w tym również w przestrzeni geologicznej, jako materialne powierzchnie geologiczne, że często nie zdajemy sobie z tego sprawy i nie dostrzegamy ich specyfiki. A są



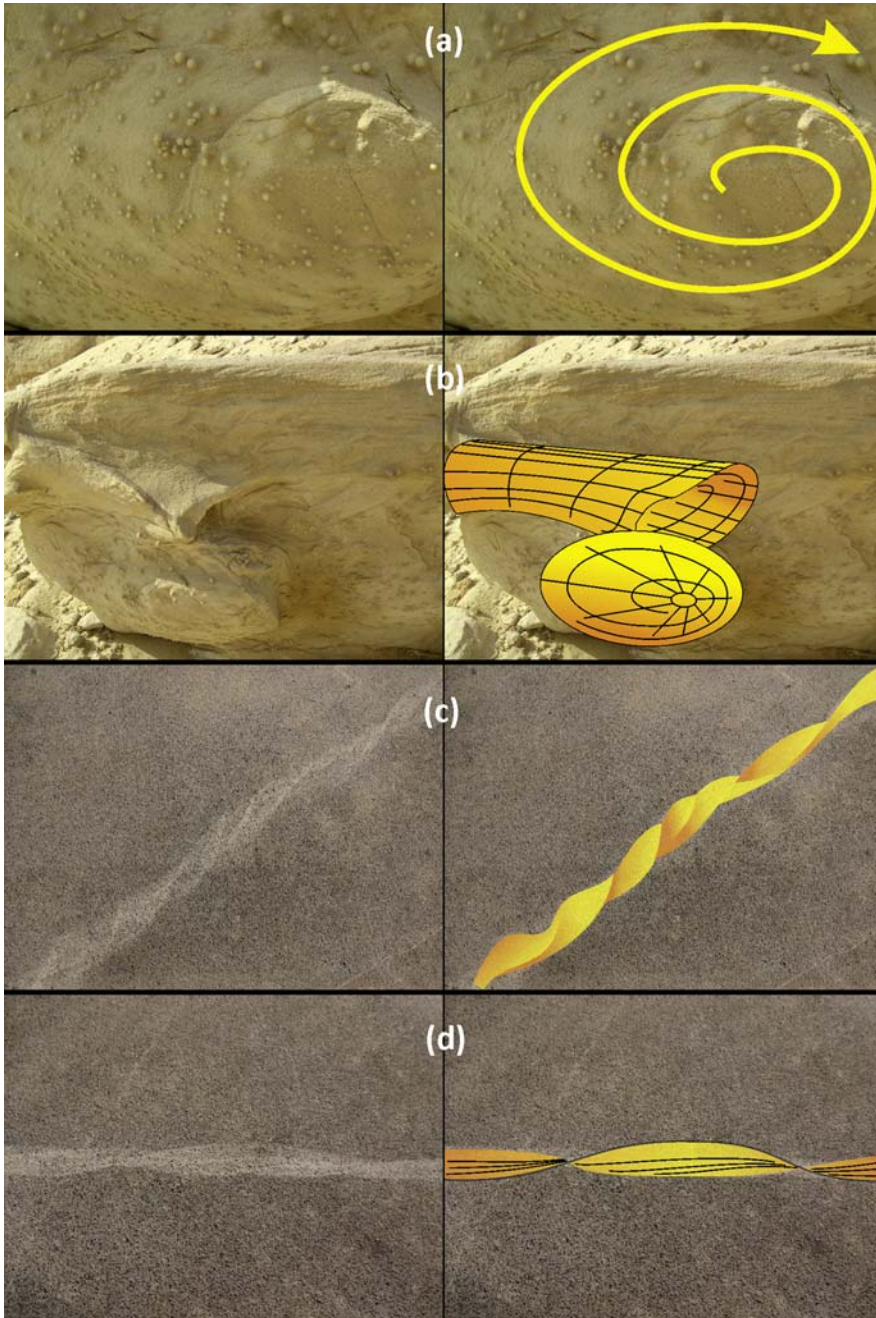
Il. 11. Model graficzny przedstawiający tzw. fald futerałowy. Przykład, jak zmieniają się względne kierunki przemieszczeń w trakcie formowania się faldy

to choćby stożkowe hałdy piasku, śmieci, czy stożki wulkaniczne, a u wylotu dolin rzecznych – stożki napływowe; walce słupów, kabli, rur, pni drzew, czy większość intruzji wulkanicznych, uskoków i koryt rzecznych; nisze osuwiskowe, łańcuchy DNA, śruby, korkociągi, czy pofałdowane warstwy (il. 11), diapiry solne, układy gałęzi drzew i brokuły; skręcone muszle ślimaków, rogi zwierząt i nieskończenie wiele innych zjawisk. Powierzchnie prostokreślne są o tyle ciekawe, że pomimo ich „zakrzywienia” możemy się przemieszczać równoległe do nich/po nich również wzdłuż linii prostej, uogólniając torem ruchu bezwładnego. Przypomnijmy, że ruch taki charakteryzuje brak lub równoważenie się wszystkich sił działających na obiekt.

Jedyną prostą powierzchnią (nie licząc płaszczyzny oraz tzw. złożonej powierzchni minimalnej Scherka), która jednocześnie jest powierzchnią minimalną i prostokreślną, jest helikoida (il. 12). Tym samym powierzchnie helikoidalne potencjalnie spełniają zarówno warunki „optymalizacji” podziału przestrzeni, są stabilne i każdy ruch wzdłuż nich łączy ze sobą, lub wzajemnie transformuje translację i rotację. Tym samym nic dziwnego, że w wielu przypadkach, kiedy obserwujemy skutki zniszczeń materiałowych (uskoki, fałdy, rozerwania, powierzchnie ścinania, rynny erozyjne itp.) (il. 13–15) lub różne sposoby uporządkowania materii w przestrzeni geologicznej (formy terenu, foliacja, strumienie lawy, intruzje magmowe) właśnie helikoidy lub ich fragmenty stanowią najczęściej spotykaną strukturę geologiczną. Strukturę, która optymalnie dzieli przestrzeń i która umożliwia „zakrzywienie” toru przemieszczenia i tym samym kompensację przestrzenną jego skutków w sferycznej i warstwowej strukturze Ziemi. Wreszcie, jako powierzchnia minimalna jest trwała po powstaniu i dlatego możemy jej obecność w przestrzeni geologicznej powszechnie obserwować. Wystarczy trochę uciec od prostoliniowości i płaskiego świata...



Il. 12. Przykłady (modele graficzne) minimalnych powierzchni prostokreślnych – prostej (z prawej, helikoida) oraz złożonej (z lewej, powierzchnia Scherka)



II. 13. Wybrane przykłady geologicznych powierzchni helikoidalnych: spiralnie (a) oraz walcowo (b) skręcony różnoziarnisty piasek prawdopodobnie wskutek turbulencji spowodowanej wstrząsem sejsmicznym (kreda, Arabia Saudyjska); (c) i (d) przykłady helikoidalnych powierzchni ścinania w luźnym osadzie (kreda, Góry Stołowe)



II. 14. Przykłady spiralno-helikoidalnych zniszczeń osadów spowodowanych kompaktacją lub wymuszoną rotacją wskutek powtarzających propagacji podłużnych fal sejsmicznych (trias, monoklina przedsudecka)



II. 15. Przykład spiralnie skręconych warstw soli, anhydrytu i iłowca w obrębie pakietu hatycznego (olistostromy) w helikoidalnej strukturze złoża soli pokładowej w Bochni

Dedykacja

Tekst ten dedykuję mojemu Tacie Henrykowi. To jego „zakręcone i relatywistyczne skrzywienie” widzenia Świata wyculiło mnie na rzeczy proste nie zawsze...

Bibliografia

- Anderson, D.L. 1989. Where on Earth is the crust? *Physics Today* 42, 38–42.
- Anderson, D.L., 2007. *New Theory of the Earth* (2nd edition). Cambridge University Press, 384 p.
- Anderson, D.L., Natland, J.H., 2005. A brief history of the plume hypothesis and its competitors: Concept and controversy. In: Foulger G. R., Jurdy D. M. [eds.] – *Plates, Plumes and Planetary Processes*, Geological Society of America Special Papers, 430: 119–145.
- Angevine, C.L., Heller, P.L., Paola, C., 1990. *Quantitative Sedimentary Basin Modeling*. AAPG Con. Ed. Course Note Series, 32, 247 p.
- Burns, R.G., 1993. *Mineralogical Applications of Crystal Field Theory*. Cambridge University Press. 354 p.
- Harrell, J.A., Brown, V.M., 1992. The world's oldest surviving geological map – the 1150 BC Turin papyrus from Egypt. *Journal of Geology*, 100: 3–18.
- Kreutz, F., 1876. Rzecz o trzęsieniach ziemi oraz opis trzęsienia ziemi w Galicyi wschodniej 1875 r. *Kosmos*, 1: 1–119.
- Kryza, J., Staško, S., 2000. Groundwater flow rate and contaminant migration in fissure-karstic aquifer of Opole Triassic system southwest Poland. *Environmental Geology*, 39: (3–4): 384–389.
- Mallet, R., 1862. *Great Neapolitan Earthquake of 1857: The First Principles of Observational Seismology*. Royal Society. 431 p.
- McMahon, D.M., 1992. The Turin Papyrus Map the oldest known map with geological significance. *Earth Sciences History*, 11: 1: 9–12.
- Utrilla, P., Mazo, C., Sopena, M.C., Martínez-Bea, Domingo, M.R., 2009. A palaeolithic map from 13,660 calBP: engraved stone blocks from the Late Magdalenian in Abauntz Cave (Navarra, Spain), *Journal of Human Evolution*, vol. 57: 2: 99–111.
- Wojewoda, J., 2015. Zdarzenia czym są, jak skutkują i jaki pozostawiają zapis geologiczny? Krótki esej o czasie geologicznym... *Studium Generale*, t. XIX, 43–68. [ISBN 9788379771585]

