

Astrofizyka Układów Planetarnych

5 POWIERZCHNIE CIAŁ PLANETARNYCH



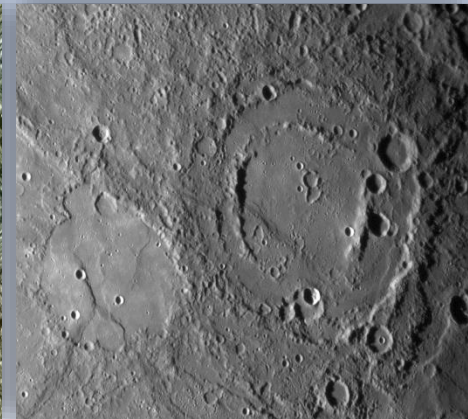
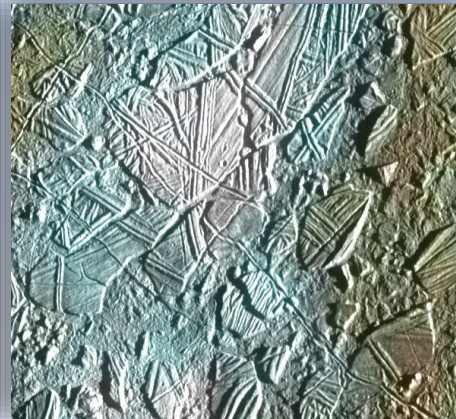
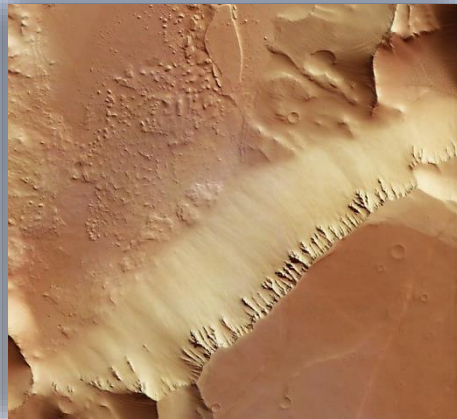
Powierzchnie planet

Różnorodność powierzchni w Układzie Słonecznym

Wszystkie obiekty w Układzie Słonecznym z wyjątkiem Słońca i planet olbrzymów posiadają stałe powierzchnie. Wygląd powierzchni jest efektem działania procesów zachodzących wewnątrz ciała, w jego atmosferze i szeroko pojętej przestrzeni międzyplanetarnej. Różnorodność powierzchni jest odzwierciedleniem bogactwa fizycznego układów planetarnych.

Mamy do czynienia z powierzchniami:

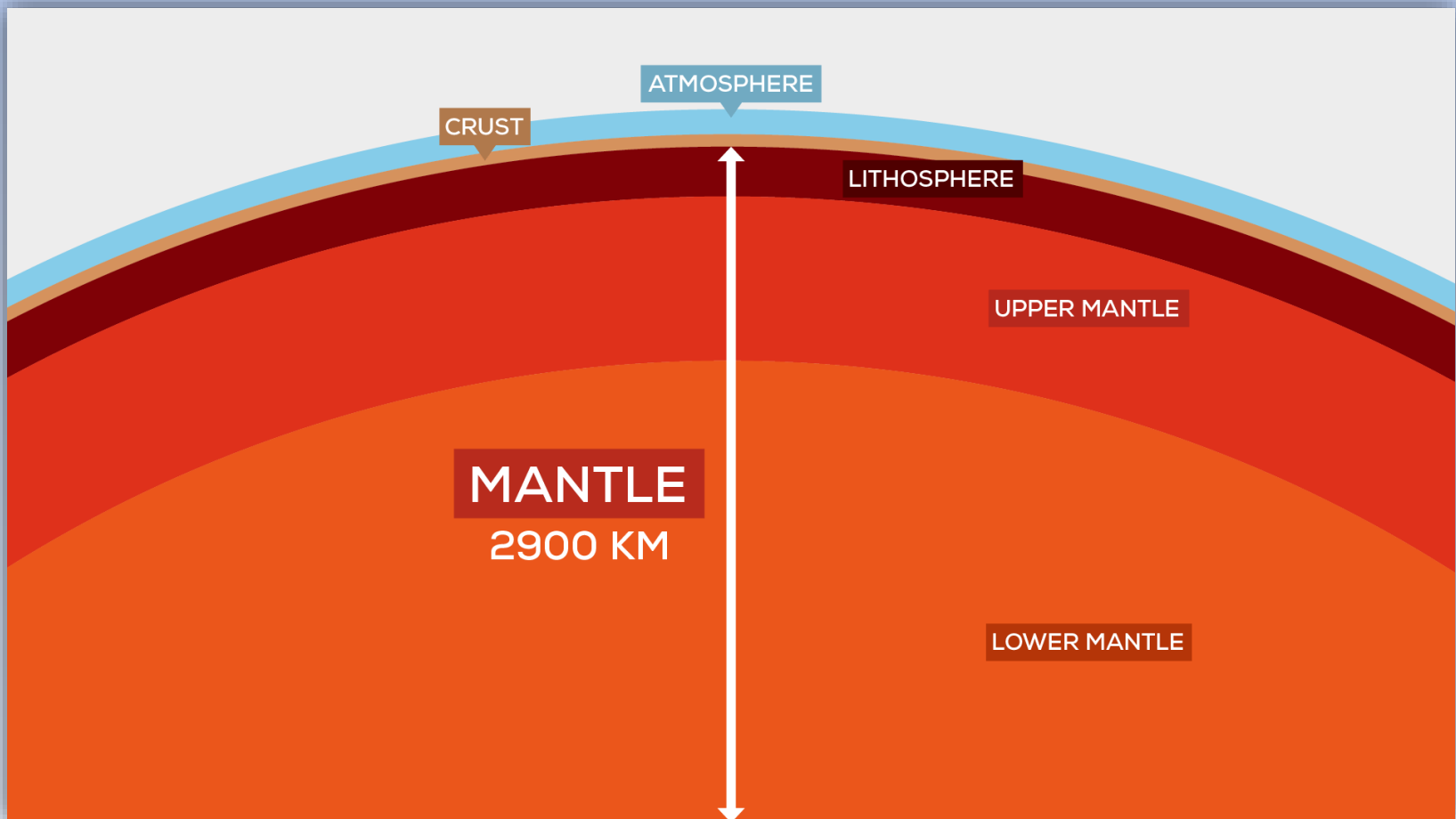
- jasnymi i ciemnymi,
- pokrytymi gęsto kraterami lub prawie bez nich,
- wykazującymi aktywność wulkaniczną (obecnie lub w przeszłości),
- noszącymi ślady aktywności tektonicznej (uskoki, skarpy, grzbiety),
- ...



Powierzchnie planet

Warstwy przypowierzchniowe (na przykładzie Ziemi)

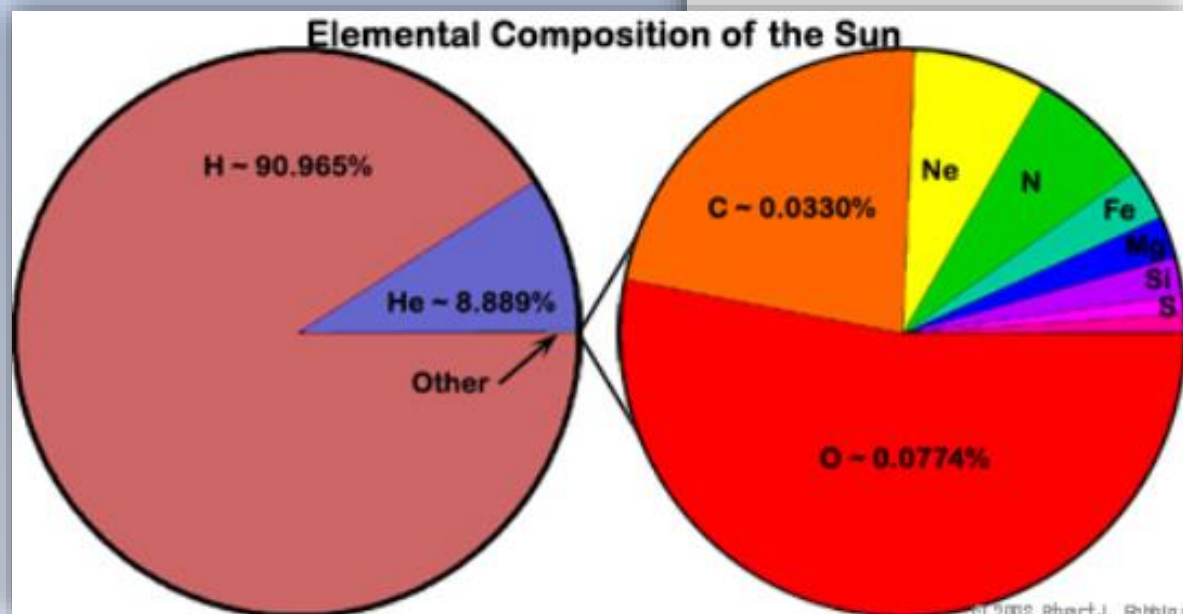
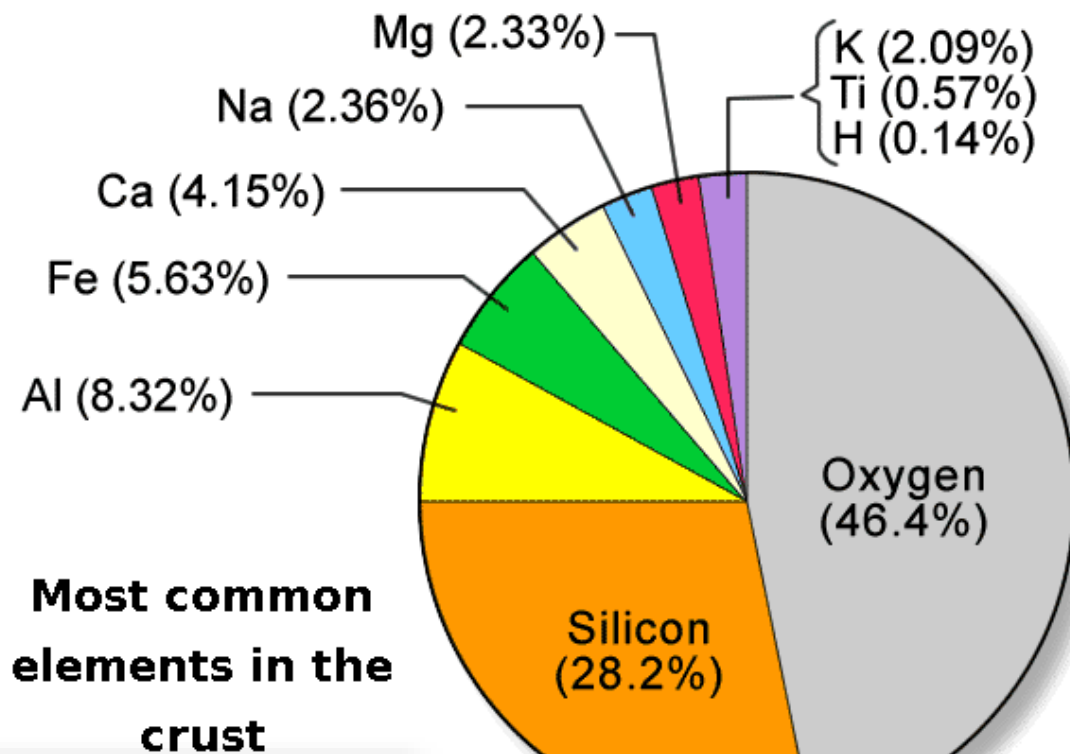
- *skorupa* (kontynentalna, oceaniczna), średnia grubość odpowiednio 6 km i 35 km
- *litosfera* (skorupa i górna część płaszcza), warstwa elastyczna o grubości do 200 km
- *astenosfera*, warstwa plastyczna umożliwiająca dryf kontynentów, grubość 200-300 km



Powierzchnie planet

Pierwiastki

Skład chemiczny skorupy nie odzwierciedla słonecznej obfitości pierwiastków (warunki w mgławicy protoplanetarnej, dyferencjacja obiektu)



Powierzchnie planet

Skąły i minerały

Powierzchnie ciał skalistych (skorupa) zbudowane są ze skał i lodów. **Skąły są dużymi skupiskami minerałów jednorodnych lub różnorodnych.** Właściwości skał i minerałów badane są przez petrologię i mineralogię.



- **Minerał to naturalnie występujący w postaci stałej (krystalicznej) pierwiastek lub związek chemiczny.**
- Cechy minerału zależą od składu chemicznego i struktury krystalicznej.
- 95% minerałów to minerały rzadkie.
- Lód wodny i inne lody astrofizyczne są minerałami.
- Minerały skałotwórcze to główne minerały tworzące skały. Jest ich około 200.

Powierzchnie planet

Skąły i minerały

Minerały klasyfikowane są ze względu na ich budowę chemiczną (gromady):

- pierwiastki rodzime, stopy (miedź, srebro, **grafit**, elektrum (Ag+Au), krzemki (krzem+metal))
- siarczki i podobne (zawierają S^{2-} , np. **piryt**)
- tlenki i wodorotlenki (zawierają O^{2-} , np. hematyt)
- halogenki (sole kwasów halogenowodorowych, np. **chlorek sodu**)
- węglany i podobne (zawierają $(CO_3)^{2-}$, np. kalcyt)
- siarczany i podobne (zawierają $(SO_4)^{2-}$ np. **baryt**)
- fosforany i podobne (zawierają $(PO_4)^{3-}$, np. apatyt)
- krzemiany i podobne (najbardziej rozpowszechnione minerały, zawierają SiO_4^{4-} , np. **forsteryt**)
- organiczne (substancje krystaliczne powstałe z udziałem materiału organicznego, np. węglowodorów)
- lody (lekke związki chemiczne w stanie stałym, np.: H_2O , CH_4 , NH_3 , CO_2)

sole kwasów tlenowych



grafit



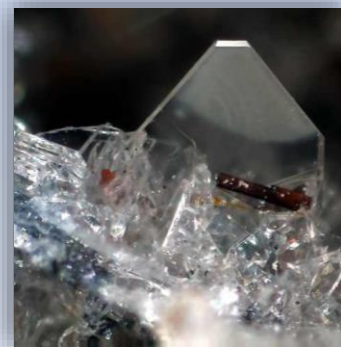
piryt



chlorek sodu



baryt



forsteryt

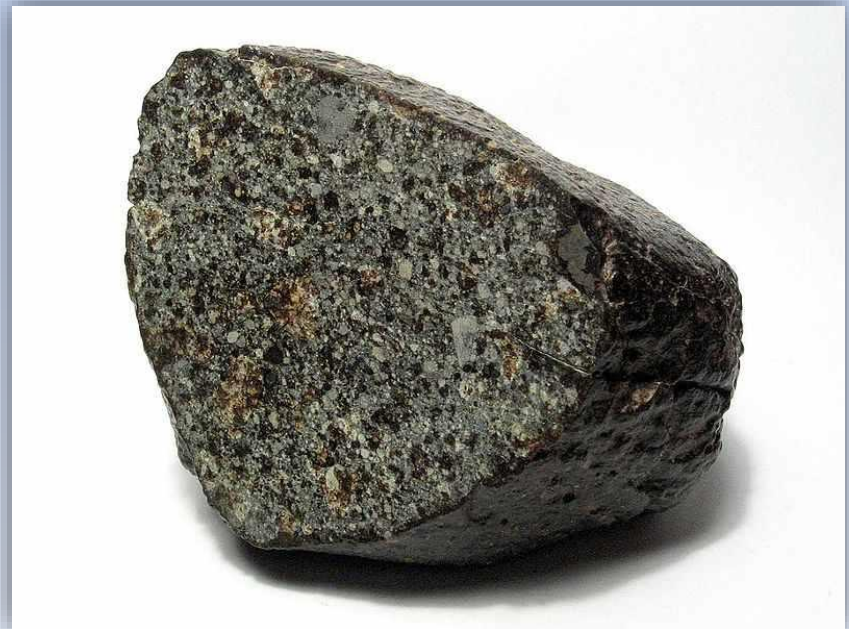
Powierzchnie planet

Skały i minerały

Skały klasyfikowane są według historii ich formowania. Wyróżnia się 4 główne typy skał: **pierwotne**, **magmowe**, **metamorficzne** i **osadowe**. Dodatkowym typem jest **brekcja**.

Skały pierwotne

Są to skały, które uformowały się podczas kondensowania materii z mgławicy protoplanetarnej. Nigdy nie były poddane działaniu wysokich temperatur i ciśnień, nie przeszły transformacji we wnętrzach większych obiektów. Występują powszechnie na powierzchniach planetoid i budują meteoryty.



chondryt

Powierzchnie planet

Skąły i minerały

Skąły magmowe

Skąły te powstają w wyniku zestalenia się magmy. Są najpowszechniejszym typem skał na powierzchniach obiektów, które przeszły fazę topienia. Dzielą się na dwie grupy:

- *skąły plutoniczne (głębinyowe)* – powstają z magmy stygnącej pod powierzchnią; stygnięcie zachodzi wolno, dzięki temu skały te mają *strukturę jawnokrystaliczną* (duże ziarna minerałów); przykład: granit
- *skąły wulkaniczne (wylewne)* – powstają na powierzchni; magma stygnie szybko i kryształy minerałów nie osiągają dużych rozmiarów (*struktura skrytokrystaliczna*); przykład: bazalt



granit



bazalt

Powierzchnie planet

Skąły i minerały

Skąły metamorficzne

Są to skąły, które przeszły zmiany fizyczne lub/i chemiczne wskutek działania wysokich temperatur i ciśnień oraz kontaktu z aktywnymi chemicznie związkami (np. roztwory hydrotermalne). Metamorfoza zachodzi pod powierzchnią obiektu. Metamorfizowana skąła nie może ulec stopieniu, ale może mieć kontakt z magmą.

Przykłady skał metamorficznych:

- *gnejs* – powstaje np. z granitu
- *amfibolit* – powstaje ze skał wulkanicznych
- *serpentynit* – powstaje z skał bogatych w magnez



Powierzchnie planet

Skąły i minerały

Skąły osadowe

Skąły te powstają na obiektach posiadających atmosferę. Są końcowym stadium przenoszenia i osadzania materiału przez wiatr, deszcz lub przepływy cieczy. Nagromadzony materiał po scementowaniu staje się skałą. Skąły osadowe dzielą się na następujące grupy:

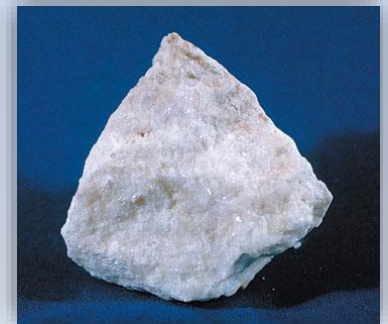
- **skąły okruchowe** – powstają wskutek niszczenia, transportu i osadzania ze starszych erodujących skał; rozmiary osadzanych okruchów wpływają na formę powstającej skały; przykład: **piaskowiec** powstający ziaren o rozmiarach 0.1-2 mm.
- **skąły chemiczne** – powstają przy oddziaływaniu skał z substancjami chemicznymi rozpuszczonymi w wodzie lub atmosferze; przykładem jest **wapień** efekt – reakcji CO_2 i krzemianów.
- **skąły ewaporatowe** (ewaporaty) – powstają, gdy wyparowuje zbiornik cieczy, pozostawiają osady na jego dnie; przykładem jest sól czy **trawertyn**
- **skąły organogeniczne** – powstają z osadzania się materiału organicznego; przykłady: kreda, węgiel



piaskowiec



wapień



trawertyn

Powierzchnie planet

Skały i minerały

Brekcja (okrucowiec)

Skały te składają się z ostrokrawędzistych okruchów o różnych rozmiarach scementowanych ze sobą. Typy brekcji:

- *uderzeniowa* – powstaje przy upadku meteorytów; często pokrywa dna kraterów
- *wulkaniczna* – powstaje z materiału piroklastycznego (bomby wulkaniczne, pumeks, popioły wulkaniczne)
- *tektoniczna* – efekt kruszenia skał podczas ruchów tektonicznych i wtórnego spojenia okruchów
- *hydrotermalna* - powstaje pod działaniem gorącej wody w wnękach skalnych (w obszarze uskoku tektonicznych)
- *osadowa* – osadowe skały okrucowe



brekcja osadowa



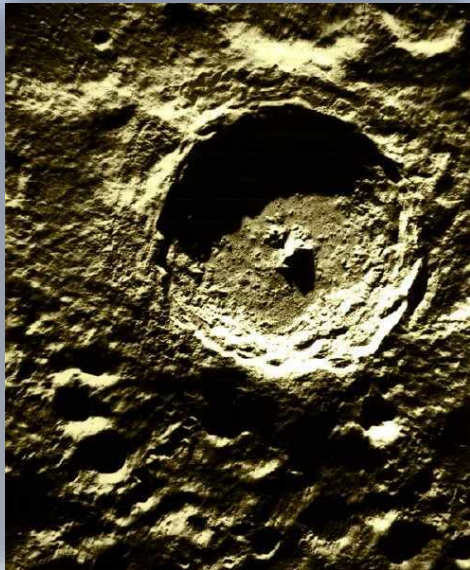
brekcja uderzeniowa

Powierzchnie planet

Procesy kształtujące powierzchnie

Każdy obiekt w Układzie Słonecznym, posiadający stałą powierzchnię, posiada morfologię terenu (relief, rzeźba terenu), np.: góry, wulkany, kratery, kaniony, uskoki. Morfologia ta jest efektem działania procesów:

- *endogenicznych* (wewnętrznych) – napędzane są energią zgromadzoną wewnątrz ciała, jego własną grawitacją i obrotem, np. tektonika, wulkanizm
- *egzogenicznych* (zewnętrznych) – są efektem działania czynników zewnętrznych, działających w atmosferze planety i przestrzeni międzyplanetarnej, np.: upadki innych ciał, wietrzenie, erozja

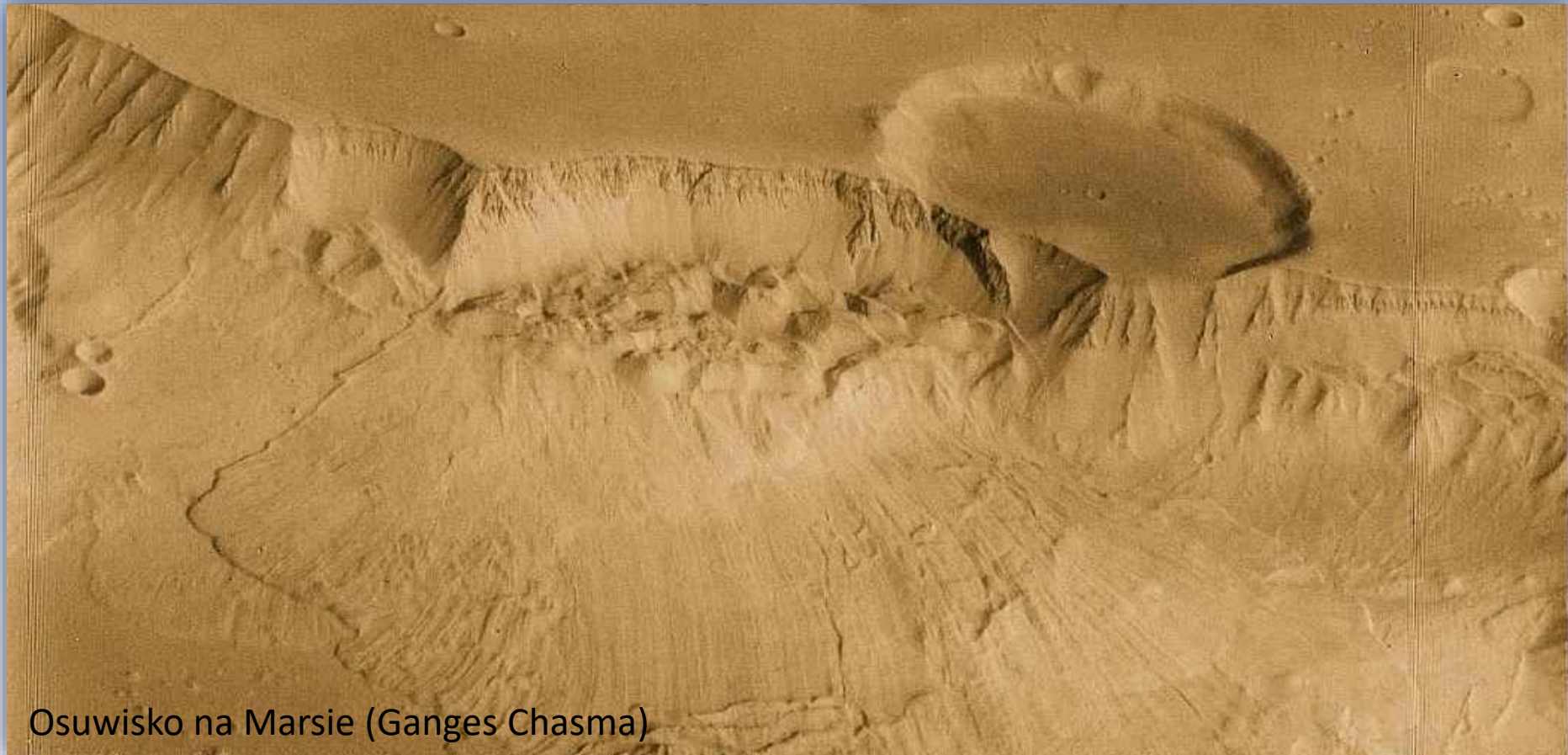


Powierzchnie planet

Procesy endogeniczne – grawitacja

Siła grawitacji odpowiedzialna jest za **ruchy masy w dół** powierzchni nachylonych: osuwiska, spływy błotne, lawiny, strumienie lawy, ruch lodowców.

Zjawiska te mogą wystąpić samoistnie (przekroczenie **kąta tarcia wewnętrznego**) lub być zapoczątkowane przez inne procesy endo- i egzogeniczne (trzęsienia, obecność cieczy).



Osuwisko na Marsie (Ganges Chasma)

Powierzchnie planet

Procesy endogeniczne – tektonika

Ruchy tektoniczne to przemieszczenia skorupy pod wpływem procesów zachodzących wewnątrz obiektu. Ruchy te powodują deformację powierzchni. Typowe tektoniczne formy terenu to:

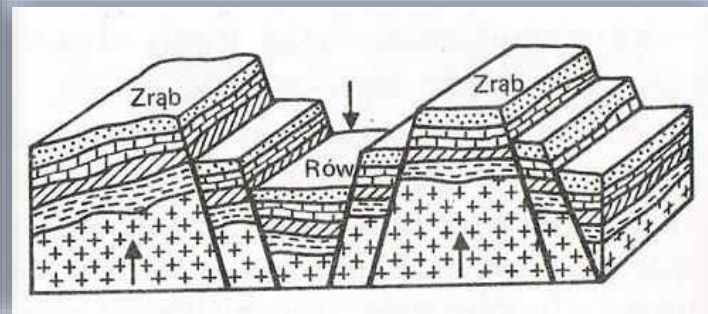
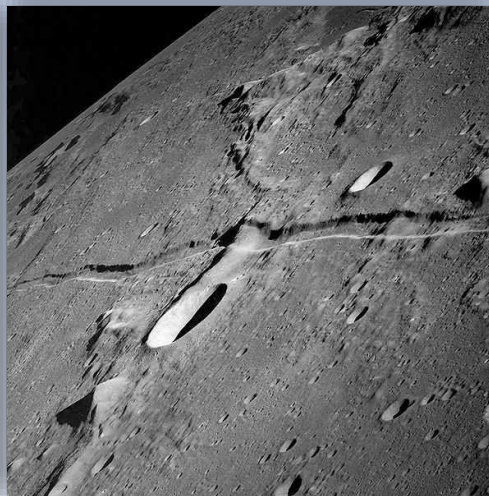
- *fałdy* – ciągłe deformacje warstw skalnych powodujące powstawanie fałdów (powstające struktury: antyklina i synklina)
- *uskoki* – deformacje powodujące przerwanie ciągłości warstw skalnych i ich względne przemieszczenie wzdłuż powstałej płaszczyzny uskokowej (powstające struktury: zręby, zapadliska/rowy)

Przyczyną ruchów tektonicznych może być kurczenie/rozciąganie skorupy lub ruchy płyt tektonicznych.

Ziemia: fałdy skalne (Kreta)



Księżyc: rów Rima Ariadaeus



Powierzchnie planet

Procesy endogeniczne – wulkanizm

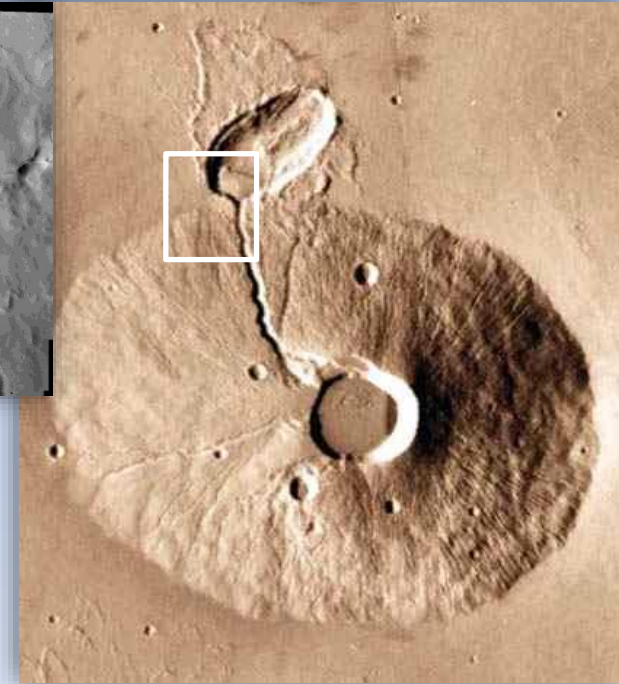
Wiele obiektów w Układzie Słonecznym posiada struktury wulkaniczne, ale tylko nieliczne wykazują aktywność wulkaniczną obecnie (Ziemia, Io, Enceladus). Dla zaistnienia aktywności wulkanicznej konieczne jest istnienie płynnego materiału o obniżonej gęstości (np. magma). Ciepło niezbędne do powstania takiego materiału może pochodzić z:

- ciepła nagromadzonego podczas formowania obiektu (akrecja, dyferencjacja)
- rozpadu pierwiastków promieniotwórczych
- oddziaływań pływowych

Typowe wulkaniczne formy terenu to:

- stożki wulkaniczne (stratowulkany, wulkany tarczowe)
- kratery wulkaniczne / kaldery
- rury/jaskinie i potoki lawowe
- *atmosfera*

Cechy utworów wulkanicznych zależą od lepkości „czynnika aktywnego” (magmy), jego temperatury, gęstości i składu, budowy skorupy i warunków fizycznych w niej panujących, siły grawitacji i obecności atmosfery.



Mars: wulkan
tarczowy Ceraunius
Tholus i krater Rahe

Powierzchnie planet

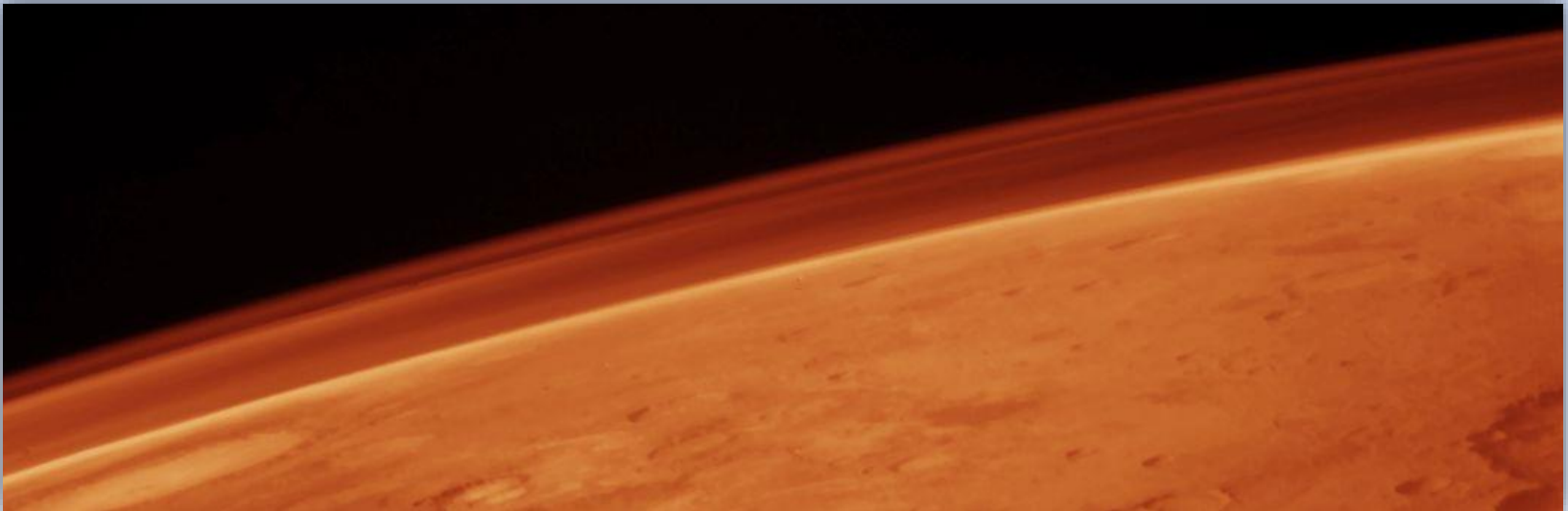
Procesy egzogeniczne – atmosfera

Powierzchnie obiektów posiadających znaczące atmosfery mogą być przez te atmosfery kształtowane w procesach fizycznych i chemicznych. Dostatecznie gęsta atmosfera wpływa też na inny proces egzogeniczny – tworzenie kraterów uderzeniowych (częściowa ochrona).

Procesy fizyczne powodują gradację i rzeźbienie powierzchni poprzez przemieszczenie materii wywołane:

- ruchem samej atmosfery (wiatr)
- przemieszczaniem się cieczy (opad, przepływ po powierzchni, zbiorniki)

Procesy chemiczne są skutkiem reakcji chemicznych zachodzących między atmosferą a powierzchnią (zależą od cech obu ośrodków).



atmosfera Marsa

Powierzchnie planet

Procesy egzogeniczne – atmosfera

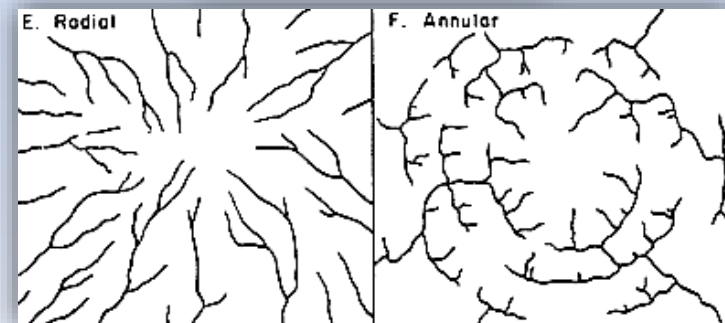
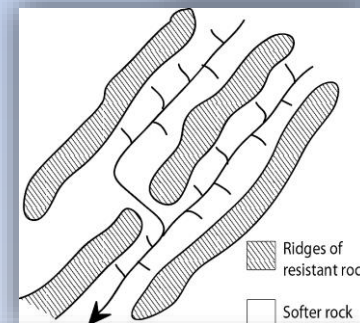
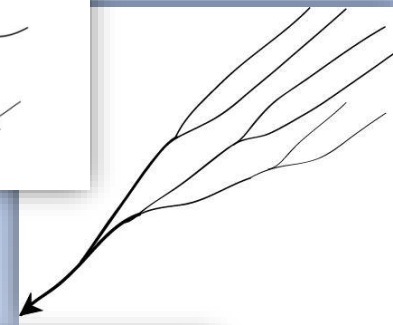
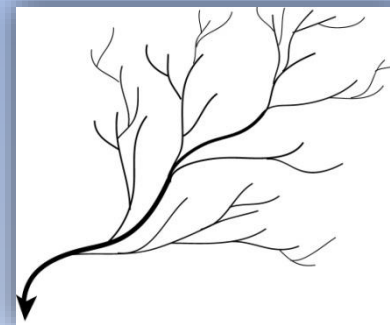
Procesy fluwialne, czyli przepływ cieczy po powierzchni („rzeki”) powodują:

- **erozję, transport i akumulację** materiału na powierzchni; procesy te powodują zarazem segregację materiału pod względem rozmiaru
- powstanie **rzeźby fluwialno-denudacyjnej** – formowanie koryt rzecznych

Kształt sieci rzecznej niesie informację o lokalnej topografii:

- układ dendryczny / równoległy – teren nachylony / znacznie nachylony
- układ kratowy – obszar występowania struktur równoległych
- układ promienisty / pierścieniowy – utwory stożkowe (np. wulkany) lub kotliny

Ciecze zgromadzone w zagłębieniach (jeziora, morza) tworzą **struktury linii brzegowej** jak plaże i klify.



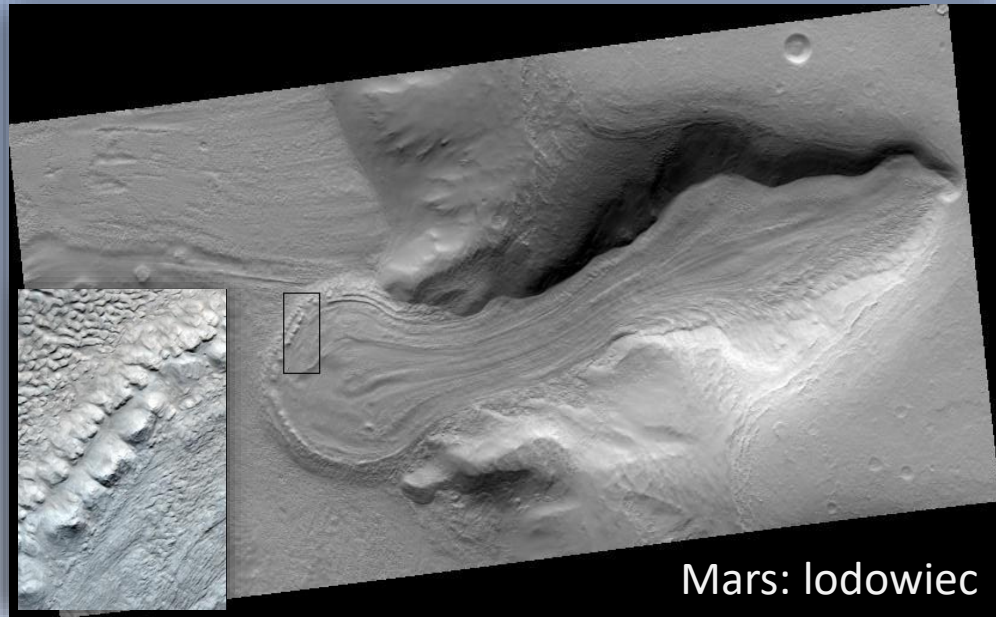
Powierzchnie planet

Procesy egzogeniczne – atmosfera

Do procesów fluwialnych można też zaliczyć **erozję lodowcową**. Lód zachowuje się jak pseudo-plastyczna ciecz. Lodowce płyną po nachylonym terenie powodując powstanie charakterystycznych struktur: doliny u-kształtne, moreny, kotły, rysy.



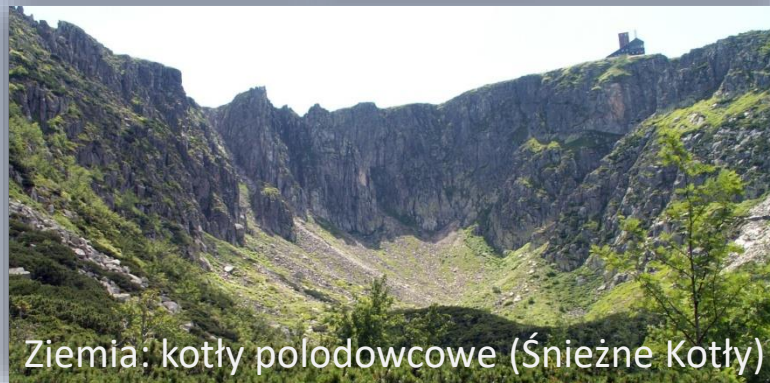
Ziemia: lodowiec



Mars: lodowiec



Ziemia: dolina U-kształtna



Ziemia: kotły polodowcowe (Śnieżne Kotły)



Ziemia: rysy lodowcowce

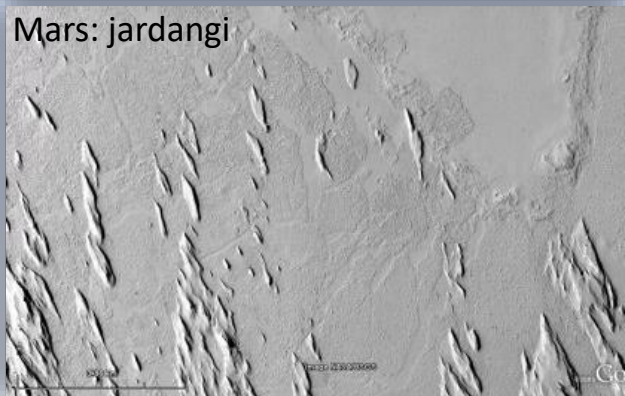
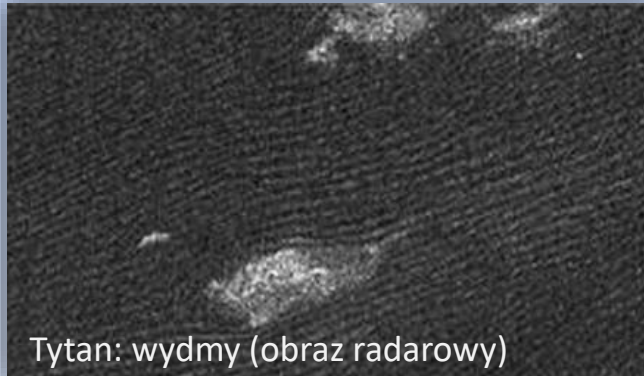
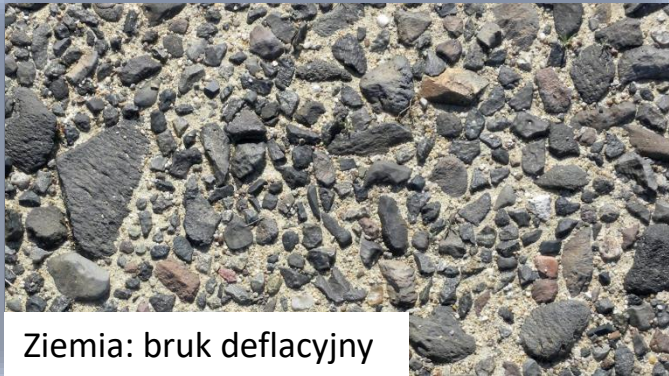
Powierzchnie planet

Procesy egzogeniczne – atmosfera

Na **procesy eolityczne**, czyli erozję wiatrową, składa się niszczenie, transport i osadzanie. Niszczenie wiatrowe składa się z:

- **deflacji** – wywiewanie zwięzłego materiału skalnego (misy, bruki deflacyjne)
- **korazji** – szlifowanie, ścieranie i żłobienie powierzchni przez materiał niesiony wiatrem (jardangi, grzyby skalne)

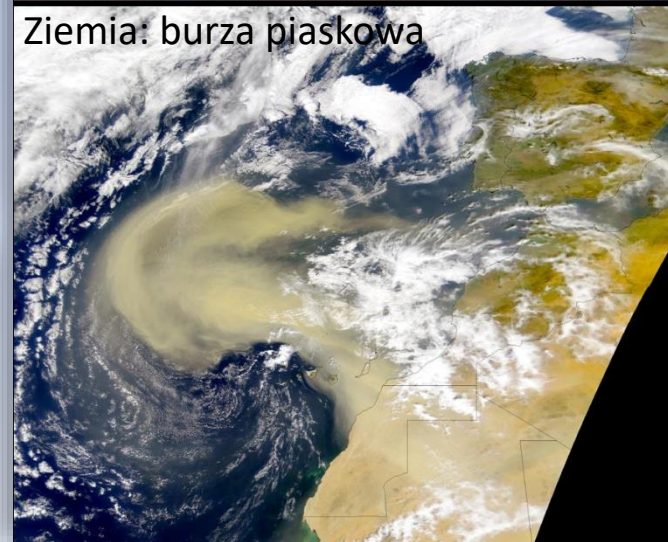
Zerodowany materiał jest akumulowany w postaci np. zmarszczek eolicznych i wydmy.



Powierzchnie planet

Procesy egzogeniczne – atmosfera

Transport w erozji wiatrowej odbywa się poprzez unoszenie, podrzucanie, toczenie, przesuwanie. Przejawem działalności transportowej wiatru są burze pyłowe/piaskowe lub wiry pyłowe.



Powierzchnie planet

Procesy egzogeniczne – atmosfera

Wietrzenie jest procesem niszczącym powierzchnię bez przenoszenia materiału. Wietrzenie następuje pod wpływem działania czynników fizycznych i chemicznych.

Wietrzenie fizyczne (mechaniczne), np:

- **termiczne** – niszczenie poprzez ciągłe rozszerzanie i kurczenie przy cyklicznych zmianach temperatury
- **mrozowe** – kruszenie przy zamarzaniu wody znajdującej się w szczelinach
- **solne** – proces podobny do mrozowego, ale czynnikiem niszczącym jest krystalizująca sól

Wietrzenie chemiczne zmienia skład chemiczny materiału poprzez reakcje chemiczne zachodzące pomiędzy atmosferą a powierzchnią, prowadząc do jego rozpadu.

Przykładowo:

- **rozpuszczanie** – usuwanie cząsteczek materiału pod wpływem substancji rozpuszczającej
- **utlenianie** – łączenie się cząsteczek materiału z tlenem

Ziemia: gołoborze
(efekt wietrzenia mrozowego)

Ziemia:
kociołek wietrzeniowy

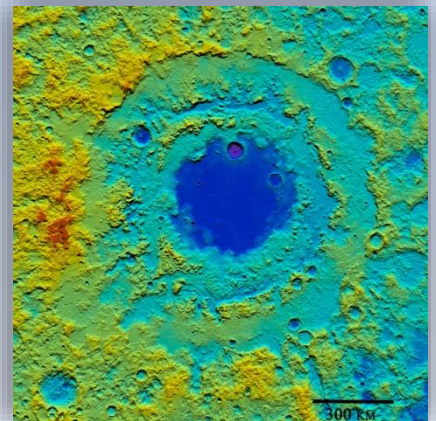
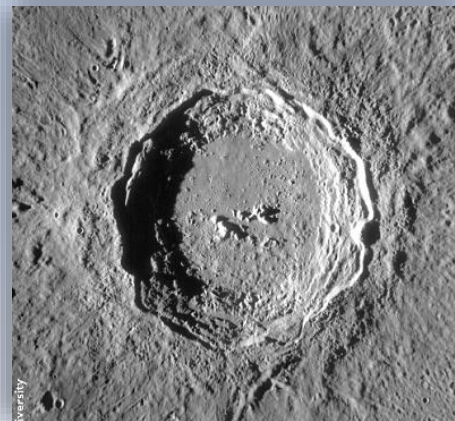
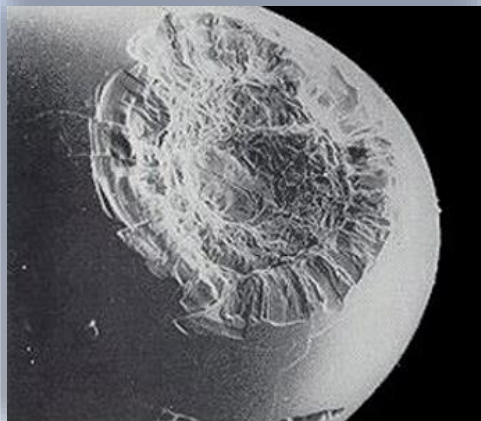


Powierzchnie planet

Procesy egzogeniczne – tworzenie kraterów uderzeniowych

Kraterzy uderzeniowe to najpowszechniej występująca forma powierzchniowa w Układzie Słonecznym. Powstają wskutek zderzeń z innymi ciałami. Przy zderzeniu wydzielana jest energia rzędu 10^{12} erg/g.

- *mikrokraterzy* – rozmiar do 1 cm; są tworzone przez ciała o rozmiarach mm i mniejszych; obecne tylko na obiektach pozbawionych atmosfery; dno mikrokrateru pokrywa często zeszlony materiał
- *kraterzy proste (małe)* – średnica do kilku kilometrów; dno wklęsłe; głębokość wynosi ok. 1/5 średnicy
- *kraterzy złożone (duże)* – średnica kilkadziesiąt - kilkaset km; dno płaskie, na środku pojedyncze wniesienie lub pierścień wzniesień; brzeg wewnętrzny schodkowy
- *baseny uderzeniowe (wielopierścieniowe)* – rozmiary nawet powyżej 1000 km, dno płaskie, czasami pokryte zastygłą lawą; brzeg złożony z wielu koncentrycznych pierścieni

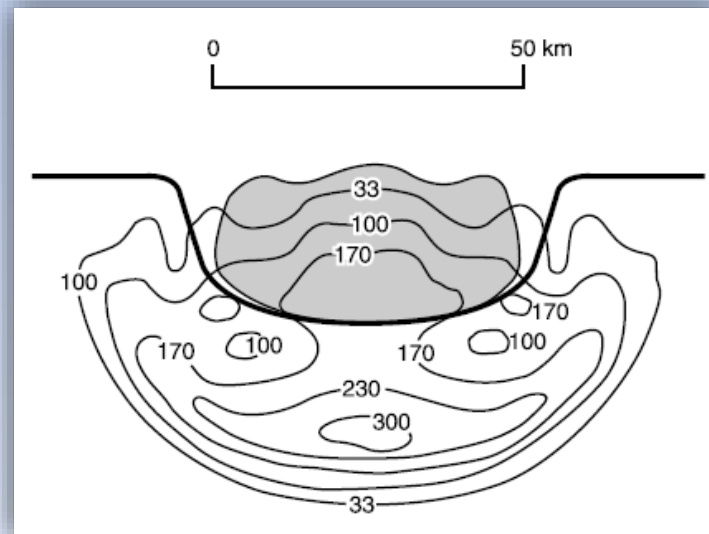
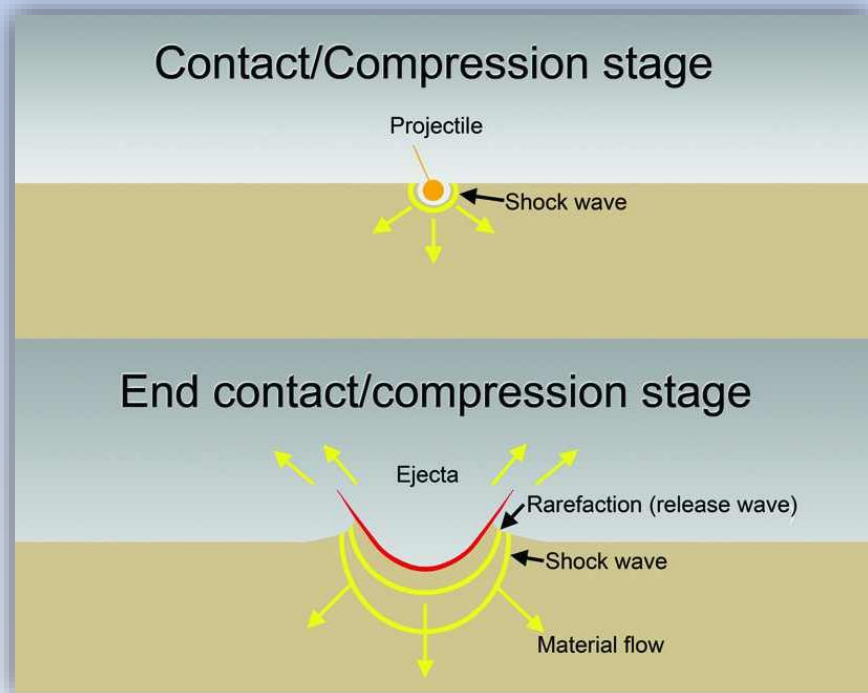


Powierzchnie planet

Procesy egzogeniczne – tworzenie kraterów uderzeniowych

Proces powstania krateru uderzeniowego zaczyna się w momencie pierwszego kontaktu „pocisku” z „celem” a kończy, gdy ostatnie wyrzucone z krateru fragmenty skał opadną na powierzchnię. W procesie wyróżnia się trzy fazy:

- **faza kontaktu i kompresji** – przy kontakcie „pocisku” i „celu” energia kinetyczna zamieniana jest w naddźwiękowe fale uderzeniowe rozchodzące się w obu obiektach. Rozchodzenie się fal powodują szybką kompresję a następnie dekompresję materiału co prowadzi do jego stopienia lub odparowania (intruz może wyparować prawie całkowicie („kula ognia”). Cała faza trwa znacznie poniżej 1 sekundy.

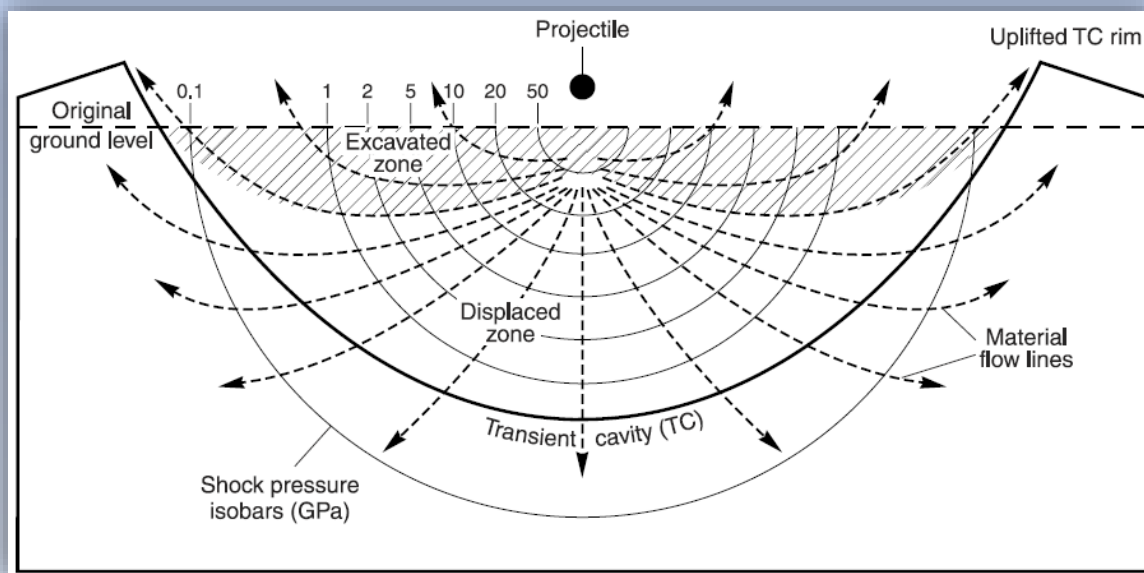
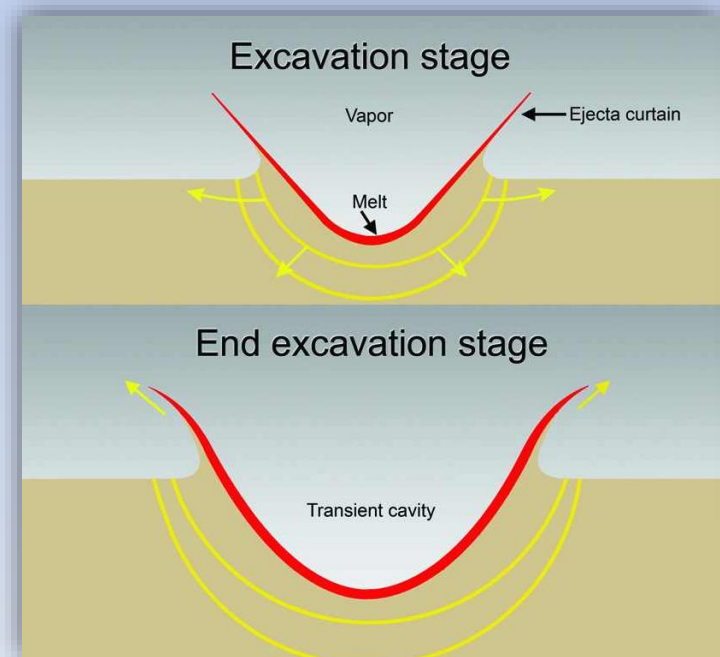


Ciśnienie (w GPa) fali uderzeniowej wytwarzanej przy uderzeniu ciała o śr. 50 km w skalną powierzchnię (czas: 1 s od początku zderzenia).

Powierzchnie planet

Procesy egzogeniczne – tworzenie kraterów uderzeniowych

- **faza ekskawacji** (wyrzucania) – fale kompresji i dekompresji rozchodzące się w uderzonym obiekcie powodują wyrzucenie i przemieszczenie materiału prowadząc do „otwarcia” krateru. Wyrzucony materiał porusza się początkowo do góry i na zewnątrz tworząc kurtynę o kształcie stożka, a po opadnięciu na powierzchnię – pokrywę wokół krateru (czasem krater wtórne). Krater istniejący pod koniec tej fazy nazywany jest przejściowym. Cała faza trwa do kilku minut.

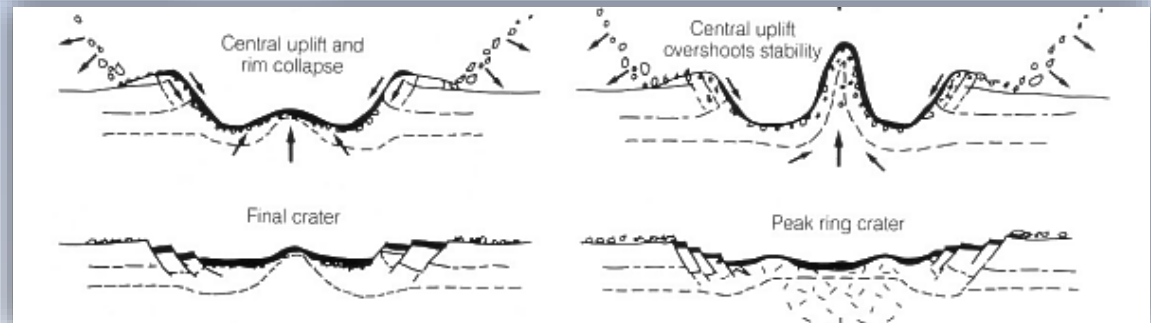
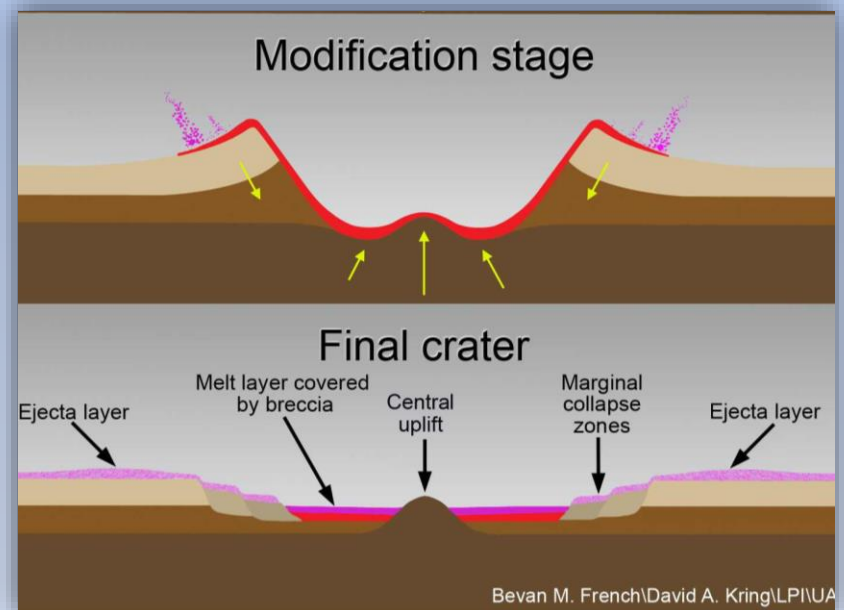
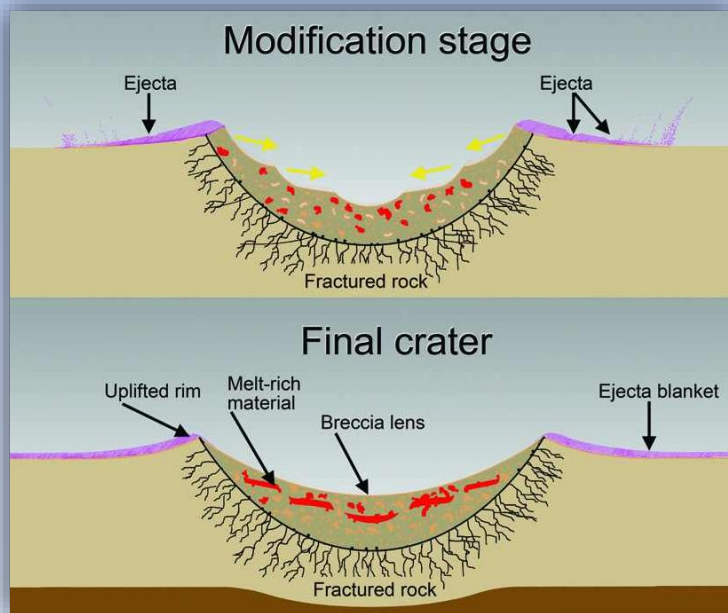


Przekrój przez krater przejściowy. Pokazano izolinie ciśnienia fali uderzeniowej (półokręgi, w GPa). Strzałki pokazują przemieszczanie się materiału w obszarze powstającego krateru. Obszar zakreskowany – strefa materiału wyrzuconego z krateru.

Powierzchnie planet

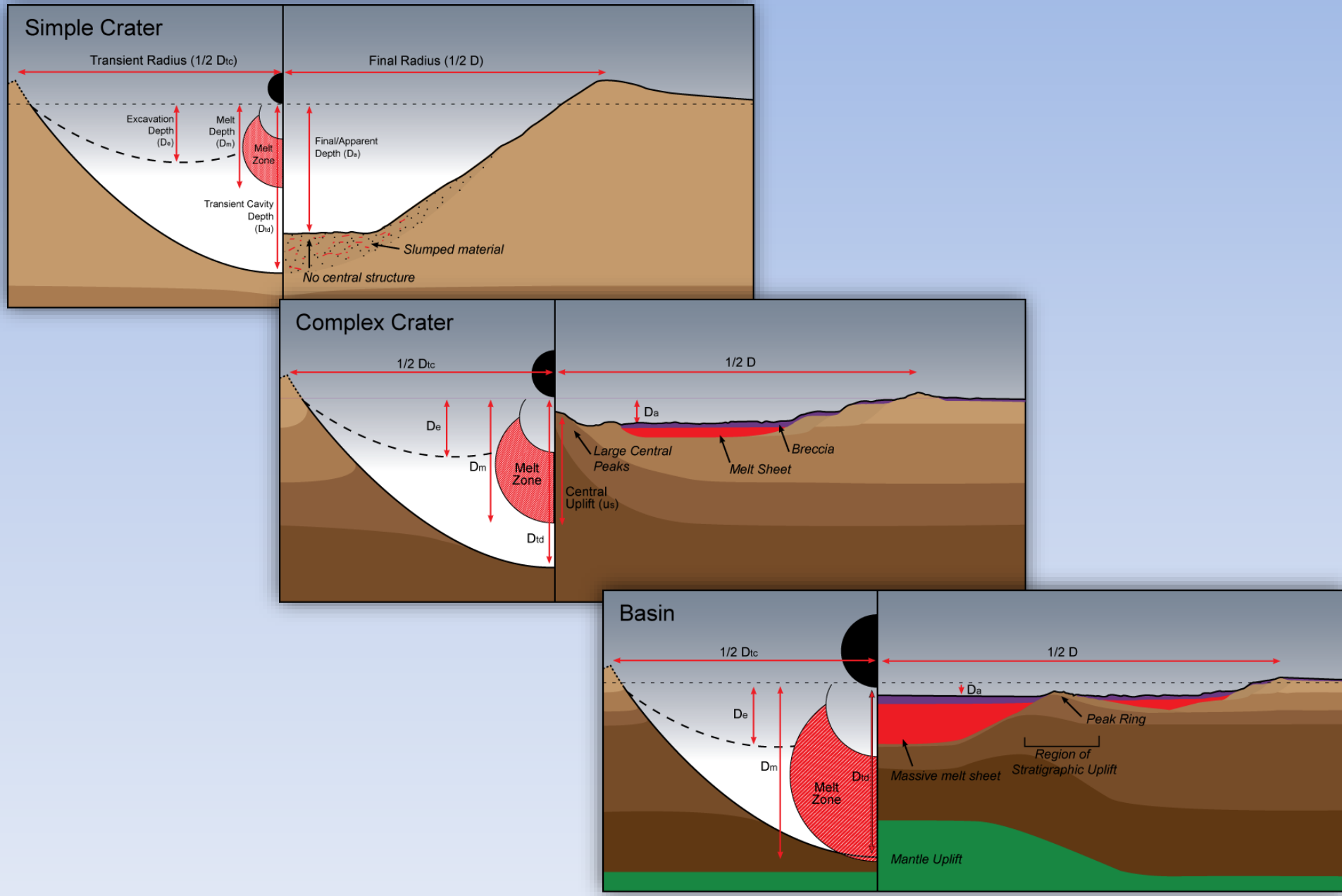
Procesy egzogeniczne – tworzenie kraterów uderzeniowych

- *faza zapadania i modyfikacji* – kiedy wyczerpuje się energia fal uderzeniowych, kształt krateru przejściowego zaczyna podlegać procesom geologicznym związanym z grawitacją. Dochodzi do modelowania dna krateru (wynoszenie dna, powstanie wzniesienia centralnego) i osuwania jego krawędzi. Krater przybiera postać końcową



Powierzchnie planet

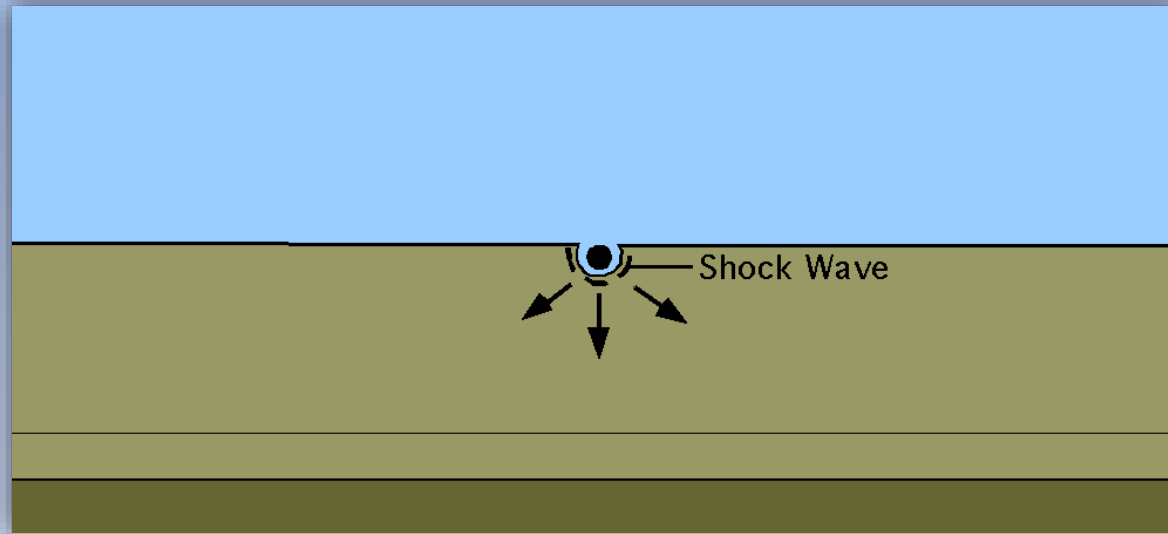
krater przejściowy i końcowy – porównanie



Powierzchnie planet

Procesy egzogeniczne – tworzenie kraterów uderzeniowych

wszystkie fazy razem



podsumowanie zmian w miejscu zderzenia

