

TEKTONIKA PLANET - wykład ogólnouniwersytecki

wykładowca: dr Wojciech Ozimkowski (Wydział Geologii UW)

Wykład 0: Tektonika - zarys problematyki (dla osób spoza Wydziału Geologii)

TEKTONIKA [gr.]: Dział geologii, nauka o budowie skorupy ziemskiej oraz o przyczynach, przebiegu i skutkach procesów prowadzących do jej **deformacji**. (Encyklopedia PWN).

GEOTEKTONIKA – dział tektoniki zajmujący się procesami tektonicznymi zachodzącymi w skali globalnej (np. geosfery, płyty litosfery), lub regionalnej (platformy, tarcze, ryfty, orogeny).

Geosfery Ziemi – skorupa, płaszcz i jądro (zewnątrzne i wewnętrzne), lub (pod względem fizycznym): **litosfera, astenosfera, mezosfera, barysfera**. Litosfera – sztywna, astenosfera – plastyczna. Litosfera kontynentalna (grubsza) i oceaniczna (cieńsza). Dolna granica litosfery zwykle odpowiada izotermie $\sim 1300^{\circ}\text{C}$ (= częściowe stopienie skał).

Tektonika płyt – dominująca współcześnie teoria tłumacząca wielkoskalowe ruchy ziemskiej litosfery działaniem prądów konwekcyjnych w płaszczu.

Płyty litosfery - rozległe fragmenty litosfery, przemieszczające się poziomo względem sąsiednich fragmentów, po bardziej plastycznym podłożu (astenosferze).

Granice płyt: rozbieżne = akrecyjne (grzbiety śródoceaniczne), zbieżne (rowy oceaniczne), poziomoprzesuwowe (uskoki transformacyjne).

3 rodzaje granic zbieżnych: ocean - ocean, ocean - kontynent, kontynent - kontynent.

Granice pasywne - granice między litosferą kontynentalną a oceaniczną w ramach tej samej płyty.

Cykl Wilsona = powstawanie i zanik oceanów. Podstawowe stadia cyklu: 1 - ryftowe, 2 - Morza Czerwonego, 3 - Oceanu Atlantyckiego, 4 - dojrzałe (Pacyfik), 5 - schyłkowe (M. Śródziemne), 6 - kolizyjne, 7 - pokolizyjne.

Ryft: wielka (kilkadziesiąt km szerokości, do kilku tys. km długości), obniżona strefa tektoniczna, rozwinięta na ogół w obrębie kontynentalnej skorupy ziemskiej; obrzeżona obustronnie lub jednostronnie przez uskoki normalne.

Orogen: wielka, prostolinijna lub łukowata struktura tektoniczna powstała w wyniku **orogenezy** (ruchów górotwórczych – fałdowań i ruchów nasuwczych).

Powstawanie i rozpad „superkontynentów”. Wędrowki kontynentów. Szybkość przemieszczeń.

Pióropusze płaszczu i plamy gorąca.

Pióropusz płaszczu: kilkusetkilometrowej średnicy „komin” gorącej materii unoszącej się od granicy płaszczu z jądrem aż do astenosfery; na powierzchni Ziemi powoduje powstanie plamy gorąca = owalnego obszaru o średnicy do 1500 km o znacznie podwyższonym strumieniu ciepłym, cieńszej litosferze, czasem z towarzyszącym wulkanizmem.

Tektonika platformowa.

Platforma = stabilny tektonicznie obszar kontynentu, składa się z dwóch pięter strukturalnych:

- 1 fundamentu (podłoża, zwykle ze skał magmowych i metamorficznych = „krystaliniku”) i
- 2 pokrywy platformowej zbudowanej głównie ze słabo zdeformowanych skał osadowych.

Tarcza – fragment platformy pozbawiony pokrywy skał osadowych (zbudowany z krystaliniku).

Rozłam wgłębny: wąska, długa strefa głębokich pęknięć litosfery; charakteryzuje się m.in. długotrwałą aktywnością tektoniczną; znaczna część rozłamów wgłębnych utożsamiana jest obecnie z dawnymi lub współczesnymi granicami płyt litosfery.

Izostazja - stan równowagi grawitacyjnej między litosferą i astenosferą. Konsekwencje izostazji.

Neotektonika – współczesne i młode ruchy tektoniczne. Szybkość ruchów tektonicznych.

TEKTONIKA

Deformacje = odkształcenia są wynikiem działania **sił**, które powodują w ośrodku skalnym powstanie **naprężeń**.

Odkształcenie (deformacja) powoduje zmianę kształtu lub/i objętości.

Siła = wypadkowa oddziaływań mechanicznych na punkt materialny ze strony innych punktów materialnych lub pól siłowych. Jest wielkością wektorową.

Naprężenie = ogół sił wewnętrznych, wywiązujących się w ciele stałym w rezultacie działania czynników dążących do odkształcenia ciała.

Naprężenia: normalne i ścinające.

Normalne (prostopadłe):

ściskające = **kompresyjne** → skrócenie tektoniczne (**kontrakcja**),

rozciągające = **tensyjne** → poszerzanie tektoniczne (**ekstensja**).

Ścinające (styczne): → poślizg, lub → obrót = rotacja

Trójosiowy układ naprężeń: 3 wzajemnie prostopadłe **osie naprężeń**: σ_1 , σ_2 i σ_3

$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ = stan hydrostatyczny (kula) = brak tektoniki

$\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$ = elipsoida obrotowa

$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ = elipsoida trójosiowa.

Osiom naprężeń σ_1 , σ_2 , σ_3 odpowiadają osie **odkształceń**: **C**, **B** i **A**.

Im większe naprężenie, tym większe odkształcenie

Właściwości mechaniczne skał – skały **izotropowe i anizotropowe**.

Skały o charakterze podatnym = mają dużą zdolność do odkształceń ciągłych,

warunki podatne - to takie warunki, w których skały wykazują własności podatne (np. przy podwyższonym ciśnieniu i temperaturze).

Skały kruche i warunki kruche - to takie, w których łatwo następuje zniszczenie.

Sprężystość i plastyczność skał.

Reologia; pełzanie = zjawisko (powolnego) odkształcania się skał zachodzące w czasie, przy stałych wartościach naprężeń.

Struktura tektoniczna: jakikolwiek obiekt utworzony przez procesy tektoniczne, czyli składnik budowy tektonicznej dający się wyodrębnić na podstawie pewnego zespołu cech (R.Dadlez, W.Jaroszewski 1994).

Strukturami tektonicznymi są zarówno obiekty jednostkowe (fałd, uskoki, spękanie), jak i zbiory obiektów, stanowiące pewną całość (kraton, pasmo fałdowe, ryft).

Deformacje:

1 - **ciągłe** = fałdowe,

2 - **nieciągłe** (dysjunktywne) = uskoki i spękania.

Fałd – wygięcie warstw bez przerwania ich ciągłości – ku górze = antyklina, ku dołowi = synklina.

Elementy i parametry fałdu: **skrzydła**, **przegub**, **oś**, powierzchnia (płaszczyzna) osiowa.

Podstawowe **mechanizmy fałdowania** – zginanie, ścinanie i płynięcie.

Klasyfikacje fałdów (uproszczone):

- geometryczno – strukturalna: fałdy koncentryczne, symilarne i dysharmonijne;
- geometryczno – kinematyczna: fałd stojący, pochylony, obalony, leżący i przewalony;
- ze względu na położenie osi: fałdy poziome, pochylone i pionowe.

Układ sił a orientacja fałdów:

- 1 - osie fałdów są równoległe do osi naprężenia pośredniego σ_2 ,

- 2 - naprężenie maksymalne σ_1 jest prostopadłe do osi fałdów.

Podatność skał a rodzaj fałdowania:

niepodatne = zginanie = fałdy koncentryczne,
 podatne = ścinanie = fałdy zygzakowate,
 bardzo podatne = płynięcie = fałdy dysharmonijne.

Tektonika grawitacyjna, tektonika solna, glacitektonika.

Tektonika nieciągła (uskoki i spękania).

Spękanie = przerwanie ciągłości ośrodka skalnego bez przemieszczenia. Spękania seryjne - cios, kliważ. Zespoły i systemy spękań. Miąższość warstw a gęstość spękań.

Uskok = przerwanie ciągłości ośrodka skalnego + przemieszczenie.

Podstawowe **rodzaje uskoków** – **normalne, odwrócone i przesuwcze** – ich związek z polem naprężeń (odpowiednio: rozciąganie, ściskanie, ścinanie).

Klasyfikacje uskoków: zrzutowe (normalny i odwrócony), przesuwcze (prawo- i lewoprzesuwcze), zrzutowo-przesuwcze (normalno-przesuwczy i inwersyjno-przesuwczy), rotacyjne (nożycowy, zawiasowy).

Skrzydła uskoku: wiszące i zrzucone; powierzchnia uskokowa. Zrzut uskoku.

Zespoły i systemy uskoków (ortogonalne, diagonalne), uskoki komplementarne.

Odkucia i nasunięcia = poziome (lub prawie poziome) przemieszczenia mas skalnych.

Odkłucie: przemieszczenie mas skalnych wzdłuż powierzchni o osłabionej spójności, najczęściej wzdłuż powierzchni uławiczenia lub granicy między skałami wyraźnie różniącymi się właściwościami mechanicznymi, jest niekiedy początkową fazą procesu nasunięcia.

Nasunięcie: struktura tektoniczna będąca wynikiem poziomego przemieszczenia zwartych mas skalnych względem podłoża wzdłuż poziomej lub bardzo słabo nachylonej powierzchni nieciągłości (powierzchni nasunięcia) na znaczną odległość.

Płaszczowina: pokrywa mas skalnych dużych rozmiarów, oderwana od podłoża i przemieszczona wzdłuż prawie poziomej powierzchni nasunięcia na znaczną odległość (do 200 km); często wewnątrz silnie sfałdowana i zdeformowana.

TEKTONIKA PLANET – 1 (OGUN)

Wykład 1: Tektonika i planety - definicje. Źródła danych.

Problemy:

- Czy procesy prowadzące do powstawania struktur tektonicznych mogą działać - poza Ziemią - na innych planetach i czy możliwe jest ich badanie?
- Na Ziemi tektonika jest głównie wynikiem działania sił endogenicznych (względnych). Czy na innych planetach występują dostateczne siły endogeniczne i czy właściwości fizyczne tych planet umożliwiają ich mechaniczne deformowanie (np. czy mają sztywne skorupy, dające się odkształcać).
- Jak szerokie jest pojęcie tektoniki? Czy niektóre deformacje pochodzenia egzogenicznego (zewnątrznego) można uznać za tektoniczne? Czy takie deformacje i prowadzące do nich procesy występują tylko na planetach, czy też na innych obiektach (głównie księżycach)?

Stąd potrzeba dokładnej definicji pojęć „planety” i „tektoniki”.

PLANETY.

<http://encyklopedia.pwn.pl>: PLANETY [gr.], ciała niebieskie o średnicach większych niż 1000 km, obiegające gwiazdę i nie mające własnych źródeł energii promienistej, widoczne dzięki oświetleniu ich promieniowaniem gwiazdy.

Współczesne kryteria planety wg. Międzynarodowej Unii Astronomicznej IAU (2006):

- 1 - obiega gwiazdę,
- 2 - jest dostatecznie duża, by pod wpływem własnej grawitacji przyjąć kształt kulisty (średnica co najmniej kilkuset km),
- 3 - jej orbita nie przecina się z orbitami innych ciał = została z nich wyczyszczona (Pluton nie spełniał 3. kryterium i w 2006 przestał być planetą – trafił do nowej kategorii „planet karłowatych”).

Definicje „astronomiczne” eksponują kwestię orbity = planeta obiega gwiazdę.

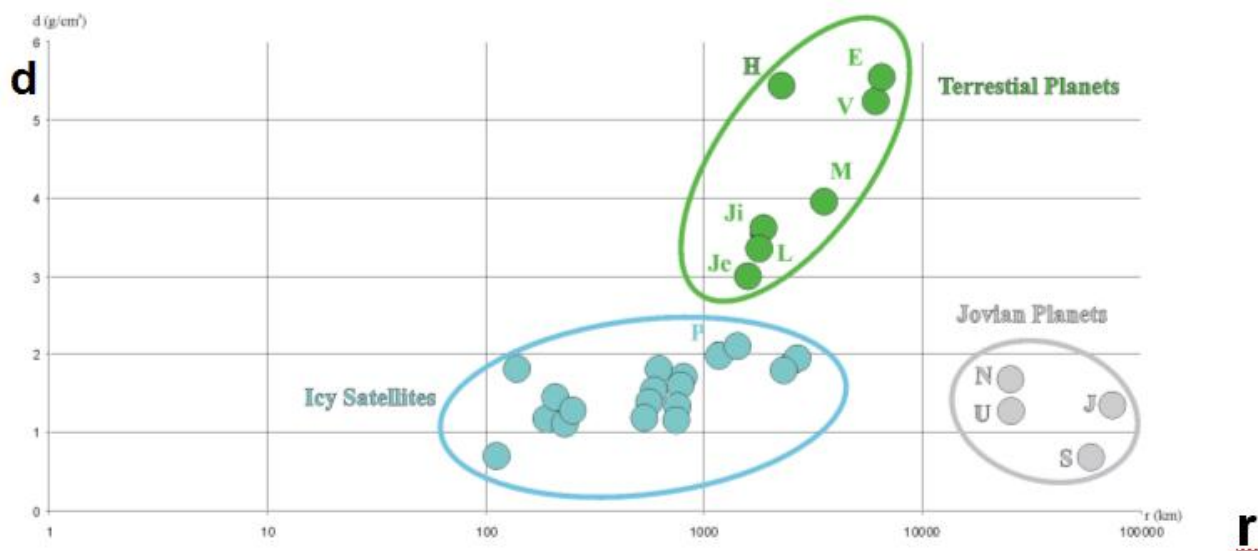
Definicje „geologiczne” - ważniejsza jest wielkość i budowa wewnętrznej, orbita nieistotna.

Wniosek: przyjmując definicje „geologiczne” za „planety” możemy uznać też duże księżycy = łącznie kilkadziesiąt obiektów w Układzie Słonecznym.

Aby na planetach/księżycach mogły zachodzić procesy tektoniczne, muszą one mieć dostatecznie duże rozmiary i gęstość.

Intensywność procesów endogenicznych jest związana z rozmiarami planet, a występowanie zwartej skorupy z ich gęstościami, stąd:

“**Porządkowanie Układu Słonecznego**” według rozmiarów i gęstości (diagram r:d).



Skorupa (litosfera itp.) może występować powyżej pewnej gęstości planety (przy założeniu wzrostu gęstości w głąb planety = po wcześniejszym stopieniu i dyferencjacji).

Aby występowała skalna skorupa, średnia gęstość planety musi być większa niż gęstość większości skał ($2 - 3 \text{ g/cm}^3$). Przy mniejszych gęstościach (ale $> 1 \text{ g/cm}^3$) może być to skorupa lodowa.

Wykres zależności promieni [r] (oś x - skala logarytmiczna) i gęstości [d] planet + księżyców (oś y - skala liniowa) – pozwala wyróżnić 3 grupy planet/księżyców, różniące się rozmiarami i składem:

- **skalne** z metalicznym jądrem (Terrestrial Planets = **planety typu ziemskiego**) – średnie promienie, duże gęstości ($> 3 \text{ g/cm}^3$),
- **lodowe** (różne lody, nie tylko H_2O) ze skalnym jądrem (Icy Satellites = **lodowe księżycy**) – małe promienie, małe gęstości (zwykle $1 - 2 \text{ g/cm}^3$),
- **gazowe olbrzymy** (Jovian Planets) – wielkie promienie, małe gęstości (poniżej 2 g/cm^3).

Procesy tektoniczne mogą zachodzić na planetach i księżycach o dostatecznych rozmiarach i gęstościach (= planety typu ziemskiego i lodowe księżyce).

Duże rozmiary = możliwe procesy endogeniczne (mała szybkość stygnięcia i większa produkcja ciepła radiogenicznego).

Duża gęstość = możliwa sztywna skorupa skalna (ale lodowa też może ulegać deformacjom tektonicznym).

TEKTONIKA.

<http://encyklopedia.pwn.pl>: „TEKTONIKA [gr.]: Dział geologii, nauka o budowie skorupy ziemskiej oraz o przyczynach, przebiegu i skutkach procesów prowadzących do jej deformacji”. Dadlez & Jaroszewski 1994 („Tektonika”): “dziedzina geologii zajmująca się ruchami (przemieszczeniami) zwartych mas skalnych w litosferze traktująca o przyczynach, przebiegu i rezultatach tych ruchów”.

Dadlez & Jaroszewski 1994 („Tektonika”): “ Do tych określeń przedmiotu tektoniki często dodaje się, że ruchy tektoniczne to te, które są zasilane energią wprost ze źródeł endogenicznych (względnych). W praktyce ograniczenie to jest jednak trudne do zastosowania.”

Tu (pominięty) przegląd różnych definicji tektoniki, z których wynikają następujące

Wnioski:

- Tektonika nie musi być wyłącznie wynikiem procesów endogenicznych.
- Odkształcenia muszą być mechaniczne i zachodzić na większą skalę.
- Konieczna jest skorupa, litosfera, „zwarte masy skalne” – ulegające odkształceniom.

W geologii planet bywa przyjmowane jeszcze szersze znaczenie terminu “tektonika”: (J.F.Bell et al. 1999: The Manual of Remote Sensing, Chapter 5: Planetary Geology): “Tectonism: deformation of the lithosphere of a planet driven by either internal (volcanic, tidal, radioactive) or external (impact) forces”.

Czy można uznać kraterzy impaktowe za struktury tektoniczne? Na Ziemi na ogół nie (bo są pochodzenia egzogenicznego), choć krawędzie i dna kraterów ulegają z czasem przekształceniom tektonicznym (tektonika grawitacyjna na obrzeżach, relaksacja naprężeń i wypiętrzanie w ich dnach).

T.R. Watters & R.A.Schultz 2009, Planetary Tectonics: „...describes the tectonic landforms resulting from major **internal and external** forces acting on the outer layers of solid bodies throughout the Solar System”.

Czyli – współcześnie w tektonice planet uznaje się, że struktury tektoniczne mogą powstawać zarówno na skutek działania czynników endo-, jak i egzogenicznych (co znacznie poszerza zakres wykładu – głównie o kraterzy impaktowe).

METODY BADAŃ. Czy jest możliwe (technicznie) badanie tektoniki innych planet?

Źródła informacji: prawie wyłącznie **teledetekcyjne** (Remote Sensing). Analizowanie obrazów powierzchni planet (geomorfologii, składu) w celu rozpoznania geologii itp. = “patrzenie”, a więc teoretycznie także:

obserwacje teleskopowe – naziemne i orbitalne (teleskop Hubble’a - HST) – choć ciągle za małą rozdzielczość.

Bardziej przydatne inne metody naziemne – głównie spektroskopowe badania składu powierzchni planet/księżyców, badania radarowe.

Główne źródło informacji - **sondy kosmiczne** - klasyfikacja:

- 1 - przelot,
- 2 - orbiter,
- 3 - lądownik (stacjonarny lub ruchomy = „łazik”),

wpływ rodzaju sondy na dokładność rozpoznania – do zbadania całej powierzchni planety najlepszy orbiter, z kołową, możliwie niską orbitą okołobiegunową.

Sondy = typowa **teledetekcja**, pasywna i aktywna, wykorzystująca różne długości fal (pasma) promieniowania elektromagnetycznego - zwykle światło widzialne i/lub bliską podczerwień (IR), przy gęstych atmosferach (chmury) mikrofałe = radar (Wenus, Tytan).

Dawniej stosowane techniki: **fotograficzne** – głównie misje Apollo, **telewizyjne** (Vidicon) – Mariner 4 (1965). Cechy fotografii i TV – kartometryczność, rejestrowane pasma 400–600 nm. Obecnie praktycznie wyłącznie matryce **CCD, CMOS** – od ok. 20 lat, teraz najpopularniejsze **kamery** cyfrowe z matrycami podzielonymi na piksele, wykonujące pojedyncze zdjęcia lub **skanery** (listewka zamiast matrycy, praca ciągła). Zalety: w pełni liniowe charakterystyki zależności ilości fotonów i prądu, szerokie rejestrowane pasmo od 200 do 1110 nm, zapis cyfrowy. Wady – problemy z geometrią obrazów skaningowych (ruch obrotowy planety względem skanera).

Metody **mikrofalowe**:

- aktywne = radar,
- pasywne = głównie czujniki IR termalnej.

Techniki **spektroskopowe** → informacje o składzie (pierwiastki → mineralogia → petrologia).

Spektroskopia emisyjna (np. termalna), refleksyjna i absorpcyjna.

Klasyczna spektroskopia = punktowe pomiary charakterystyk spektralnych (punkty → profile → mapa).

Spektroskopia obrazująca (Imaging Spectroscopy) = analiza małych obszarów (piksele → mapa).

Dane **geofizyczne** = sejsmika, grawimetria, magnetyka.

Sejsmika = instalacja geofonów – tylko Księżyc (Mars – nieudane próby).

Grawimetria = ogólne dane o masach i gęstościach planet. Dane o różnicowaniach regionalnych – orbiter jako grawimetr (precyzyjny pomiar prędkości i jej zmian - wykorzystany efekt Dopplera).

Magnetyka - pola globalne (działa „dynamo” = są geosfery i przemieszczają się względem siebie) i pola regionalne (obecnie magnetyzm szczątkowy = było pole globalne, czyli są geosfery, ale nieruchome względem siebie = obecnie brak „efektu dynama”).

Dane z **ładowników** (Księżyc, Wenus, Mars, Tytan) – praktycznie punktowe (mały zasięg „łazików”), ale – w pełni wiarygodne dane na temat składu skał.

Dane z **misji załogowych** (Księżyc) – pełen zestaw informacji, ograniczony zasięg.

TEKTONIKA PLANET – 2 (OGUN)

Wykład 2: Budowa wewnętrzna planet = "geotektonika" planet

Geotektonika (Jaroszewski et al. 1985, Słownik geologii dynamicznej): “dział tektoniki zajmujący się prawidłowościami ewolucji tektonicznej w skali największej (globalnej)”.

W geotektonice 2 działy: 1 – geologia globalna, 2 – geologia wielkich struktur.

Geologia globalna = różnicowanie budowy wewnętrznej planet:

- 1 - Różnicowanie na podstawowe **3 grupy planet** (wykres r/d) – planety typu ziemskiego (Terrestrial Planets), lodowe księżyce (Icy Satellites), gazowe olbrzymy (Jovian Planets).
- 2 - Różnicowanie samych wnętrz planet = podział na **geosfery**.
Geosfery = „koncentryczne warstwy (powłoki) o różnym składzie i/lub cechach fizycznych, na które dzieli się kula ziemską” = w geologii: **skorupa, płaszcz** (górną i dolną), **jądro** (zewewnętrzne i wewnętrzne), lub: **litosfera, astenosfera, mezosfera, barysfera**.

Ad.1. Zróżnicowanie „regionalne” na 3 grupy: planety typu ziemskiego bliżej Słońca, dalej – gazowe olbrzymy i lodowe księżyce. Przyczyny zróżnicowania:

- 1 - powstanie Układu Słonecznego: mgławica → dysk protoplanetarny, już w nim zróżnicowanie rozkładu pierwiastków → grupy planet różniące się składem,
- 2 – wpływ wiatru słonecznego = „wywianie” lżejszych składników z pobliża Słońca.

Dane z innych odkrywanych aktualnie układów planetarnych nie potwierdzają tej prawidłowości.

Ad.2. Zróżnicowanie składu wewnątrz planet = **dyferencjacja gęstościowa** na skutek działania grawitacji → wewnętrzne różnicowanie planet na geosfery. Do tego konieczne jest **upłynnienie**, umożliwiające przemieszczanie materii pod wpływem siły ciężkości (gęstsze do dołu, lżejsze do góry).

Źródła ciepła powodującego upłynnienie planety:

- źródła wewnętrzne: akrecja, kollaps grawitacyjny, rozpad promieniotwórczy,
- źródła zewnętrzne: siły pływowe, impakty.

Podział według długości działania:

- krótkotrwałe (akrecja, kollaps),
- długotrwałe (promieniotwórcze, pływowe),
- epizodyczne (impakty).

Stygnięcie planet – bilans cieplny. Rola rozmiarów planety i występowania źródeł ciepła - długotrwałych i epizodycznych.

Czas, po którym planeta wystygnie zależy od jej masy i objętości = od rozmiarów → od stosunku objętości ($\sim r^3$) do powierzchni ($\sim r^2$), oraz od wielkości strumienia cieplnego.

Mechanizmy stygnięcia, według rosnącej efektywności (szczegółowo → w. 3) 1 - promieniowanie cieplne (radiacja), 2 - przewodnictwo cieplne, 3 - erupcje, 4 - konwekcja.

Czynniki zaburzające pierwotny skład planet: kolizje, impakty itp. (“kradzieże płaszczy”), wzbogacanie o obce składniki (meteoryty, lodowe komety).

Określanie podstawowych parametrów planety/księżycy = promienia, masy i gęstości.

Promień (lub średnicę) - wyznaczano geometrycznie: odległość + średnica katowa (teleskopowo), obecnie – na podstawie pomiaru czasu zaniku sygnału radiowego sondy przelatującej za planetą.

Masa – wyznaczana z efektów grawitacyjnych (siły przyciągania planety) = zwykle z okresu orbitalnego sztucznego satelity planety lub jej księżycy, w ich braku - z zakrzywienia toru lotu ciała (zwykle sondy) w polu grawitacyjnym planety.

Średnia **gęstość** = masa : objętość (wyznaczana na podstawie promienia).

Modele gęstościowe budowy wewnętrznej planet (często wydziela się tylko płaszcz i jądro).

W uproszczeniu:

- przyjmuje się założenia ogólne = średnie gęstości geosfer (jądro, płaszcz, rzadziej skorupa),
- znajduje takie wzajemne proporcje promieni geosfer, aby wymodelowany glob miał średnią gęstość identyczną z wyznaczoną dla całej planety.

Gęstości płaszczy i jąder przyjmuje się na podstawie danych z badań meteorytów (i z „ziemskiej” geofizyki).

Testowanie przyjętego modelu polega najczęściej na badaniu odkształceń planety i zaburzeń jej ruchu wirowego:

na podstawie przyjętego składu, oraz grubości płaszcza (czasem i skorupy) i jądra określa się warunki fizyczne (temperaturę, ciśnienie) panujące wewnątrz planety, a na ich podstawie właściwości mechaniczne geosfer (sprężystość, podatność, lepkość itd.), a stąd zachowania globu jako całości.

Zwykle bada się:

- 1 - odkształcenia wywołane ruchem wirowym (spłaszczenie),
- 2 - moment bezwładności przy wahaniach położenia osi (precesji), zależny od rozkładu mas.

3 grupy planet – porównanie budowy wewnętrznej.

Planety typu ziemskiego (Terrestrial Planets) – jądro metaliczne, płaszcz skalny

(glinokrzemianowy). Merkury, Wenus, Ziemia + Księżyc, Mars, 2 księżycy Jowisza (Io i Europa).

Lodowe księżycy (Icy Satellites) – jądro skalne, płaszcz lodowy. Cały zewnętrzny Układ Słoneczny oprócz 4 gazowych olbrzymów i 2 księżyców Jowisza to lodowe księżycy. Różne rodzaje lodów (skład, przemiany fazowe) – własności fizyczne zależnie od temperatury i ciśnienia. Większość tych lodów to w warunkach ziemskich ciecze lub gazy.

Gazowe olbrzymy (Jovian Planets) – kule gazowe (z jądrami skalnymi?), brak zwartej powierzchni i wyraźnych granic „geosfer”. Kwestia ogromnych rozmiarów i odległości od Słońca.

Wspólne cechy (oprócz rozmiarów i składu): małe gęstości (0,69 – 1,64), szybki ruch wirowy, bardzo silne pola grawitacyjne i magnetyczne, liczne księżycy i pierścienie.

Jowisz:

promień	= 71 493 km = 11,2 x Ziemi
masa	= 318 x Ziemi
gęstość	= 1,33 g/cm ³ = 0,24 gęstości Ziemi
średnia odległość od Słońca	= 5,20 AU*
rok	= > 12 lat
dość	= 9 h 55 min
księżycy	67, w tym 4 duże

Saturn:

promień	= 60 268 km = 9,5 x Ziemi
masa	= 95 x Ziemi
gęstość	= 0,69 g/cm ³ = 0,125 gęstości Ziemi
średnia odległość od Słońca	= 9,54 AU
rok	= 29,5 lat
dość	= 10 h 14 min
księżycy	62, w tym 5 dużych

Uran:

promień	= 25 500 km = 4 x Ziemi
masa	= 14,5 x Ziemi
gęstość	= 1,29 g/cm ³ = 0,23 gęstości Ziemi
średnia odległość od Słońca	= 19,2 AU
rok	= 84 lata
dość	= 17 h 54 min
księżycy	27, w tym 5 dużych

Neptun:

promień	= 24 746 km = 3,88 x Ziemi
masa	= 17,1 x Ziemi
gęstość	= 1,64 g/cm ³ = 0,30 gęstości Ziemi
średnia odległość od Słońca	= 30 AU
rok	= 165 lat
dość	= 16 h 17 min
księżycy	14, w tym 1 duży

* AU = jednostka astronomiczna (j.a.) = średnia odległość Ziemi od Słońca (~ 150 mln. km)

Pas Kuipera – „plutony” (Plutinos), „transneptunians” = od 2006 - planety karłowate, w strefie 30 - 50 AU - ok. 70 000 obiektów o średnicach ponad 100 km.

Obłok Oorta – miliardy (?) komet długookresowych, 50 – 100 000 AU (→ 44 000 AU?).

TEKTONIKA PLANET – 3 (OGUN)

Wykład 3: Powierzchnie planet

Rzeźba powierzchni = geomorfologia → geneza + budowa podłoża → geologia.
Czasem + badania spektralne = skład (pierwiastki, minerały → skały).

Kartografia powierzchni planet.

Mapy topograficzne – zwykle mapy małoskalowe, na ogół brak map poziomicowych:

- kolorowe mapy hipsometryczne – najczęściej dla całych globów,
- mapy cieniowanego reliefu – dla mniejszych obszarów (zwykle czarno-białe).

Współrzędne geograficzne – φ jak a Ziemi (N i S), ale $\lambda = 0-359^\circ$ (a nie W i E).

Kartografia geologiczna – mapy całych globów = zgeneralizowane,
dokładniejsze - mapy seryjne (arkuszowe).

Treść map geologicznych – wydzielenia:

- „geomorfologiczno – geologiczne” = zwykle formy rzeźby terenu; tu m.in. → tektonika,
- „litologiczne” = petrograficzne (rodzajów skał), zawartości jakiegoś określonego pierwiastka lub minerału itp.,
- „stratygraficzne” = wieku względnego (starsze – młodsze), mało precyzyjne.

Procesy kształtujące powierzchnie planet (kolejno, według roli, jaką grają):

- 1 - bombardowanie meteorytowe (Impact Cratering),
- 2 - wulkanizm,
- 3 - procesy tektoniczne (Tectonism),
- 4 – wietrzenie.

Egzogeniczne = 1, 4; endogeniczne = 2, 3.

Bombardowanie meteorytowe - powszechność zasięgu i jego zmiany w czasie (maksimum w okresie Heavy Bombardment 4,0-3,7 mld. lat temu, potem słabnące), różnice w występowaniu kraterów na różnych planetach (kwestia ochronnego wpływu atmosfer, niszczenia przez erozję i akumulację, „resurfacingu” = odnawiania powierzchni, na ogół przez procesy endogeniczne).

„Geometria” krateru impaktowego:

okrągły (prawie bez względu na kąt padania impaktora),

lekko wyniesiony (podgięty) brzeg,

naokoło pokrywy wyrzutowe (ejecta, ejecta blanket).

Pierwotnie dno = wklęsła misa (głównie w małych kraterach).

Kratery proste i złożone:

Proste = małe, stosunek głębokości do średnicy 1:5 – 1:7, pojedyncza, gładka misa.

Złożone = stosunkowo płytsze, stosunek głębokości do średnicy 1:10 – 1:20.

1 – z centralnym stożkiem,

2 – ze strukturą pierścieniową lub wyniesieniem centralnym.

Pierwotnie każdy krater był pojedynczą, prostą misą – struktury centralne są wtórne. Średnica, przy której krater przechodzi w złożony, zależy od grawitacji danej planety: na Ziemi to przejście przy średnicy 2 - 4 km, na Księżycu – przy 15 - 20 km (im mniejsza grawitacja, tym większe krater pojedyncze = nieprzetworzone).

Dno krateru = **metamorfizm uderzeniowy** = skrajnie wysokie ciśnienia, nie występujące w innych procesach geologicznych, stąd → charakterystyczne wyłącznie dla impaktów struktury w skałach („shatter cones”, „planar features”) i wysokociśnieniowe odmiany minerałów - np. stiszowit (odmiana kwarcu). Pokruszone skały podłoża tworzą brekcje impaktowe. Na nich pokrywa stopionych skał (impact melt). Topi się jednak tylko ok. 10% skał, reszta ulega wyrzuceniu w stanie stałym → pokrywy wyrzutowe (ejecta, ejecta blanket).

Po impakcie: przetwarzanie zboczy - osuwiska, erozja → powiększanie średnicy, wypiętrzanie dna → spłykanie krateru.

Gęstość kraterów impaktowych na jednostkę powierzchni jest stosowana jako przybliżona miara wieku powierzchni (lub dowód jej odmłodzenia), przy założeniu zmniejszania się z upływem czasu przeciętnych rozmiarów meteorytów (= także kraterów). Superpozycja (nakładanie się młodszych na starsze) pokryw wyrzutowych → możliwa „stratygrafia” pokryw wyrzutowych.

Wulkanizm - ogół procesów geologicznych, zachodzących na powierzchni, związanych z wydobywaniem się lawy i innych materiałów z głębi litosfery, na skutek ruchów magmy pod powierzchnią (Wikipedia...). Czas trwania aktywności wulkanicznej zależy od źródeł ciepła, szybkości (mechanizmu) stygnięcia, oraz od wielkości planety.

Źródła ciepła (→ w. 2): 1- akrecja, 2 - kollaps grawitacyjny, 3 - rozpad radioaktywny (długotrwałe, malejące), 4 - siły pływowe (~ ciągle), 5 - impakty (epizodyczne).

Mechanizmy stygnięcia:

- 1 - radiacja = promieniowanie cieplne (IR termalna) = wypromieniowywanie ciepła, nawet w próżnię, ale stygnie tylko bardzo cienka warstwa powierzchniowa. Mało skuteczne - bardziej efektywne jest:
- 2 - przewodnictwo cieplne = przepływ ciepła przez materię. Jednak żeby efektywnie stygły głębsze części planet konieczne jest przenoszenie ciepła razem z materią, czyli:
- 3 - erupcje = wulkanizm = odprowadzanie ciepła z wylewami lawy z górnej części płaszcza/skorupy, lecz do tego konieczne jest przynajmniej lokalne upłynnienie materii. Jeszcze skuteczniejsza:
- 4 - konwekcja – przenoszenie ciepła razem z przemieszczającą się materią (gorąca się unosi, zimna opada = prądy konwekcyjne) – do tego niezbędna płynna, lub przynajmniej plastyczna (reologia!) materia. To najefektywniejszy mechanizm chłodzenia.

W stygnięciu kluczowa jest rola wielkości planety. Na ogół wydzielanie ciepła proporcjonalne do objętości (masy), stygnięcie – do powierzchni. Ogólna prawidłowość: objętość wzrasta do r^3 , powierzchnia do r^2 , w efekcie małe obiekty stygną dużo szybciej niż duże.

Zróznicowanie własności law (chemicznych, fizycznych) = różne typy wulkanów. Na Ziemi lawy bazaltowe tworzą płaskie wulkany typu hawajskiego (łagodne wylewy law o małej lepkości), a lawy andezytowe strome stożki typu andyjskiego (duża lepkość law powoduje zatykanie kominów wulkanicznych i gwałtowne erupcje, gęstsze lawy budują stromsze stożki).

Rola temperatury: chłodniej = większa lepkość (gdy stały skład), rola grawitacji: wpływ na rozmiary wulkanów (mniejsza = wyższe), zwykle interakcja wszystkich tych czynników.

Inne niż magma (lawą) „media” – „wulkanizm lodowej papki”.

Wietrzenie – czynniki:

- meteoryty - oprócz kraterów tworzą regolit,
- grawitacja → osuwiska,
- wiatr (gdy jest atmosfera) → wydmy itp. formy eoliczne,
- woda – lub inne ciecze → erozja (Mars, Tytan).

TEKTONIKA PLANET – 4 (OGUN)

Wykład 4: Księżyc - budowa wewnętrzna

Księżyc - budowa wewnętrzna

Orbita: $r = 384\,000$ km, ekscentryczność 5,5%, „rok” 27,32 dni ziemskich (27 dni 7 godz. 43 min), równa mu „doba”, oddala się od Ziemi o 3,8 cm/rok.

Promień ok. 1737 km (0,27 Ziemi), masa ok. 1,2% Ziemi, gęstość = $3,34$ g/cm³.

Położenie na wykresie r/d wskazuje, że jest to planeta typu ziemskiego.

Grawitacja = 1/6 ziemskiej (16,5%). Prędkość ucieczki 2,38 km/s.

Wczesne **teleskopowe badania** Księżyca koncentrowały się na 2 zagadnieniach:

- czy jest idealnie okrągły (jako „ciało niebieskie”), czy jednak ma rzeźbę terenu (jak Ziemia),
- czy możliwe jest wykorzystanie Księżyca do określania długości geograficznej.

Najnowocześniejsze **misje kosmiczne**: Apollo (+ Lunar Orbiter), Clementine, Lunar Prospector, Lunar Reconnaissance Orbiter.

Apollo - 1969 – 1972; misje 11-17 (prócz 13) lądowały w różnych miejscach „tej” strony, początkowo głównie na „morzach”: łącznie przywiozły 381 kg próbek skał.

Eksperymenty naukowe programu Apollo (geologiczne i o znaczeniu geologicznym):

- **Powierzchniowe:**
 - Soil Mechanics Investigation – badania mechaniki gruntu
 - Passive Seismic Experiment – instalacja geofonów - rozpoznanie budowy wewnętrznej, ogólny model budowy (geosfery),
 - Active Seismic Experiment - budowa górnych 100 m,
 - Lunar Surface Magnetometer - badanie pola magnetycznego
 - Lunar Portable Magnetometer – badanie lokalnych pól magnetycznych,
 - Traverse Gravimeter Experiment – szacunek miąższości (grubości) bazaltów morza,
 - Heat Flow Experiment - badanie strumienia ciepłego na głębokości 1,6 – 2,3 m.
- **Orbitalne:**
 - Metric & Panoramic Cameras – zdjęcia 165 x 165 km, rozdzielczość 20 m, pasy 20 km, rozdzielczość 2 m, zdjęcia stereoskopowe – różnice wysokości 10 m,
 - Laser Altimeter – pomiary punktowe co 30 km z dokładnością wysokości 10 m,
 - S-Band Transponder Experiment = rozkład mas (grawimetria),
 - Apollo Lunar Sounder Experiment = radar = penetracja skorupy do 2 km,

Clementine - 1994; misja kartograficzna, wielospektralna kamera: 11 pasm od UV do średniej IR, ok. 1 mln obrazów, dodatkowo pomiary laserowe wysokości → mapa topograficzna, mapy składu powierzchni.

Lunar Prospector - 1998-99; instrumenty nieobrazujące (spektroskopia) – uzupełnienie obrazującej Clementine: skonstruowanie dokładnej mapy składu powierzchni Księżyca.

Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) – od 2009 – orbiter, kompleksowo badający powierzchnię Księżyca, m.in. za pomocą:

Lunar Reconnaissance Orbiter Camera (**LROC**) - obrazy czarno-białe, UV i w barwach naturalnych, rozdzielczość rzędu 1 m,

Lunar Orbiter Laser Altimeter (**LOLA**) – umożliwiający sporządzanie map wysokościowych i DEM o wysokiej rozdzielczości.

Budowa geologiczna Księżyca (ogólnie): po programie Apollo:

- 1 – nie jest jednorodny (ma geosfery),
- 2 – jest stary – zachował wczesne etapy historii innych planet,
- 3 – jest bardzo stary – najmłodsze skały księżycowe mają wiek najstarszych na Ziemi,
- 4 – jest związany genetycznie z Ziemią, choć różni się proporcjami składu,
- 5 – nie ma na nim życia ani substancji organicznych,
- 6 – na powierzchni występują skały tylko 3 typów: bazalty, anortozyty i brekcje,
- 7 – we wczesnej historii został stopiony do wielkiej głębokości,
- 8 – potem przeżył serię potężnych impaktów,
- 9 – jest lekko asymetryczny (wpływ grawitacji Ziemi?),
- 10 – jest pokryty regolitem.

Wyniki badań geofizycznych = **budowa wgłębna** (sejsmika, magnetyka, grawimetria):

Jądro – według klasycznych poglądów mało wyraźne, może go nawet nie być;

- nie jest stopione (brak współczesnego pola magnetycznego, choć kiedyś było)
- jeśli jest, to $r < 450$ km (350, 220 - 450 km?), max. 25% promienia (Ziemia – 54%)
- max. 1 – 4% masy.

Obecnie dopuszcza się możliwość istnienia stopionego, lub przynajmniej częściowo stopionego jądra zewnętrznego, przy promieniu jądra ok. 480 km.

Płaszcz - wielowarstwowy, sięgający prawie do środka (1200 km?),

- suchy, niezbyt gorący, 1000^0 C jest dopiero na > 500 km,

Litosfera - jednorodna do ok. 1000 km, poniżej – **astenosfera**.

Skorupa (ogólnie)

- gruba – 60 – 70 km = do 3 x grubsza niż na Ziemi (10% masy, Ziemia – 1%),
- po II stronie jeszcze grubsza,
- górna część strzaskana impaktami (brekcje, regolit).

Wyraźna **asymetria** - przesunięcie środka ciężkości Księżyca względem środka geometrycznego o 2 km (kilkanaście km?, 2% ?) w stronę Ziemi.

Grawimetria - wykryto **maskony** = koncentracje cięższych skał pod powierzchniami mórz – ale tylko pod basenami wypełnionymi lawą = coś cięższego pochodzącego z płaszcza?

Magnetyka - stwierdzono lokalne pola magnetyczne, dość silnie zróżnicowane (namagnesowana stara skorupa strzaskana impaktami?), ale świadczące o występowaniu kiedyś pola globalnego.

Termika - strumień cieplny – wykonano punktowe pomiary w 2 miejscach i określono strumień cieplny na 18 – 24% strumienia ziemskiego.

Przez 2 mld lat Księżyc był aktywny, potem w ciągu ok. 500 mln lat ostygł, jest martwy wulkanicznie od ok. 3 mld lat (choć ostatnio są doniesienia o dużo młodszym wulkanizmie).

TEKTONIKA PLANET – 5 (OGUN)

Wykład 5: Powierzchnia Księżyca

Kartografia – mapy topograficzne i geologiczne Księżyca.

Warunki fizyczne na powierzchni:

brak atmosfery,

temperatury średnie: dzień + 107°C, noc -153°C, maksymalne: dzień + 123°C, noc - 248°C,

grawitacja = 1/6 ziemskiej (16,5%).

Procesy kształtujące powierzchnię Księżyca (w ciągu całej historii)

- bombardowanie meteorytowe - cały czas, z tendencją spadkową → „wietrzenie meteorytowe”,
- wulkanizm (bardzo dawno?),
- tektonizm (szczątkowo).

Podstawowe typy terenów: 1 - ziemie, 2 – morza, a czasem wyróżniane: 3 - baseny (na ziemiach).

„**Ziemie**”, (Terra) = kratony = 83% całej powierzchni (70% powierzchni tej- i 98% tamtej strony), nierówne, jasne (albedo 9 – 12%), stosunkowo słabo poznane (bo lądowania Apollo na „morzach”, tu – tylko Łuny = pobranie < 1 kg próbek).

Skład zdominowany przez plagioklaz = **anortozyty**, choć są też odmiany gabra - utworzone nieco później, po „oceanie magmy”. Oprócz tego - **brekcje**:

Główny proces modelujący powierzchnię „ziemi” to bombardowanie meteorytowe.

Kratery

- < 15 - 20 km pojedyncze, początkowo dno wklęsłe, w miarę wzrostu średnic - płaskie,
- > 20 km - kratery złożone = płaskie dno + stożek centralny → wyniesienie centralne,
- >175 km wyniesienia centralne płaskie i okrągłe → kratery wielopięścienne,
- > 300 km = „baseny”.

Basenów o średnicy > 300 km jest ok. 40: największy – South Pole – Aitken ma 2300 km średnicy, 13 km głębokości, Orientale – 930 km i 3 pierścienie. Część basenów wypełniona później bazaltami utworzyła „morza”.

„**Morza**” zajmują 15 - 17% powierzchni, są nierównomiernie rozłożone: ok. 30% „tej” strony i 2% „tamtej”; względnie gładkie, ciemne (albedo 5 – 8%), zwykle okrągłe, wypełniają dna bardzo starych basenów o średnicach 200-1200 km.

Skąły mórz to **bazalty** = wylewy pokrywami (warstwami) od 1 do 30 m miąższości, źródła wylewów prawdopodobnie na brzegach kraterów, łączna grubość pokryw lawowych 1 – 4 km, stanowią tylko 1% masy skorupy..

Były też erupcje piroklastyczne (znaleziono kulki szkliska wulkanicznego - „orange soil”).

Bazalty tworzyły się, gdy wewnątrz Księżyca częściowo się stopiło przy temperaturach 1000° – 1200°C na głębokości 100 – 500 km.

Są wyraźnie młodsze od lądów – na ich obszarach jest mało kraterów (i to niewielkich), potwierdzają to datowania izotopowe (3,7- 2,5 mld. lat), są więc młodsze również od basenów w których się znajdują – do 1 mld lat (400 – 700 mln?).

Mórz jest w sumie ok. 20 + 1 ocean, głównie po „tej” stronie, po „tamtej” tylko 3.

Regolit (Lunar Soil, Sediment) – skutek bombardowania meteorytowego – warstwa na morzach średnio 5 m, na łądach 10 m, ale jest i „megaregolit”: spękania od impaktów sięgają do kilku (20?) km. Regolit jest warstwowany, ale to utwory bardzo lokalne = niemożliwa ich korelacja.

Stratygrafia księżycowa. Klasyczna zasada superpozycji – brak osadów, ale są pokrywy wyrzutowe i lawowe; pomysł Gilberta (1893), wykorzystali praktycznie w 1962 Eugene Shoemaker i Robert Hackman - zaczęli „od góry” – od najmłodszych pokryw wyrzutowych w rejonie krateru Kopernika i ustalili 5 jednostek („warstw”) odpowiadających impaktom lub zjawiskom wulkanicznym (od góry). Po późniejszych modyfikacjach (1 – najstarsze, 5 – najmłodsze):

- 5 – Copernican = kratery i pokrywy wyrzutowe najmłodsze, z jasnymi promieniami
- 4 – Erathostenian = kratery starsze i ich pokrywy wyrzutowe – bez jasnych promieni,
- 3 – Imbrian Period = większość bazaltów mórza,
- 2 – Nectarian = powstanie większości basenów impaktowych,
- 1 – Prenectarian = formowanie skorupy..

Teorie powstania układu Ziemia – Księżyc. Układ powstał ok. 4,5 mld lat temu.

Skład Księżyca podobny do Ziemi, ale inne proporcje geosfer (i ilość Fe), więc różne hipotezy powstania, ale obecnie powszechnie przyjmowana teoria wielkiego impaktu (W.K.Hartmann & D. Davis, 1975).

Historia Księżyca.

Najstarsze skały = warstwa przednektaryjska (okres „oceanu magmy”?) – obecnie silnie zryte kraterami – powstały ok. 4,5 mld. lat temu, (najstarsze datowania = 4,44 mld lat). To skorupa anortozytowa – tuż po niej inne skały – noryty i trokolyty – utworzyły się gdzieś w głębi i infiltrowały skorupę anortozytową (plutony, może nawet erupcje).

To trwało do ok. 4 mld - 3,9 mld lat – wtedy nastąpił wielki impakt = powstał basen M.Nectaris + jego pokrywy wyrzutowe i wiele innych dużych kraterów, 3,8 mld lat – basen M.Imbrium i inne baseny mórza, ale na razie „suche”. To okres „Heavy Bombardment” – skorupa strzaskana do > 20 km. Potem – od 3,7 do 3,2 mld lat - wylewy lawy utworzyły większość mórza - jednocześnie z wylewami bazaltów miały miejsce erupcje piroklastyczne. Okres eratostenesowski = mniejsze kratery i powstanie reszty mórza (koniec tworzenia mórza – ok. 2,5 mld. lat), po zaniku „wulkanizmu mórza” jedynym czynnikiem kształtującym powierzchnię pozostało bombardowanie meteorytowe. Okres kopernikowski < 1,1 mld lat – kratery z promieniami (małe, < 100 km), potem tylko regolit.

Tektonika. Księżyc martwy geologicznie od 2 – 2,5 mld lat. Procesy raczej „**paratektoniczne**”:

- 1 – spowodowane bezpośrednio impaktami: np. radialny rów tektoniczny (?) Alpine Valley,
- 2 – spowodowane pośrednio impaktami: „Imbrian Grooves” w NW części basenu South Pole – Aitken = rowy i zręby tektoniczne powstałe na skutek kumulacji fal sejsmicznych na antypodach impaktu, który spowodował powstanie basenu Morza Deszczów (koncepcja obecnie negowana, a struktury te uważane są za nałożenie się pokryw wyrzutowych, które obiegły cały glob).

Obciążenie bazaltami mórza powodowało ugięcie centralnych części basenów, oraz zapewne uaktywnianie starych uskoków w podłożu. Obciążenie bazaltami → ugięcie → naprężenia tensyjne (rozciągające) w częściach zewnętrznych mórza → serie koncentrycznych spękań i rowów tektonicznych (**Fossae**) na obrzeżach. Bliżej centrum basenu w wyniku działania kompresji → grzbiety zmarszczkowe „**concentric wrinkle ridges**” (buckling ridges).

Geneza grzbietów niezupełnie jasna:

- 1 - tektoniczna = kompresyjna, fałdowa,
- 2 - tektoniczna = kompresyjna, nad uskokami odwróconymi,
- 3 - tektoniczna – deformacje pokryw lawowych nad pogrzebanymi przez nie wewnętrznymi pierścieniami basenów wielopierścieniowych,
- 4 - to są tylko czoła potoków lawowych lub ślady ich płynięcia (= brak tektoniki).

Geneza tektoniczna (1-3) zakłada reakcję astenosfery na obciążenie przez 1 - 2 km bazaltów.

Obecnie astenosfera na Księżycu jest bardzo głęboko, a gruba skorupa uniemożliwia reakcję izostatyczną – czyli jeśli reakcja izostatyczna zachodziła, to dawniej skorupa była cienka?

Lunar scarps – skarpy rozwinięte nad uskokami odwróconymi w podłożu. Na podstawie obrazów z LRO (2015) stwierdzono ich >3200. Są zorientowane w sposób wskazujący na ich związek z działaniem sił pływowych.

W kraterach „wypłaszczanie” i pęknięcie dna obserwowane już przy ich średnicach < 20 km.

Hipotezy:

- 1 – relaksacja topograficzna = geneza odprężeniowa,
- 2 – wypiętrzanie lakkolitów pod kraterami?

Wypłaszczanie dna przez relaksację topograficzną możliwe dopiero przy średnicy > 100 km, czyli to raczej lakkolity? To mogło by zostać potwierdzone grawimetrycznie (i chyba zostało przez LRO).

TEKTONIKA PLANET – 6 (OGUN)

Wykład 6: Merkury.

Orbita – silnie ekscentryczna (0,248) = 46-70 mln km (średnio 0,378 AU) → wielkie różnice nasłonecznienia między aphelium a perihelium = 4,5 – 10 x więcej niż na Księżycu, w perihelium Merkury ma największą szybkość z planet: 47 km/s.

Rozmiary: mały, $r = \text{ok. } 2240 \text{ km} = 0,35 \text{ Ziemi}$, 1,4 Księżycza, większe są niektóre księżyce Ganimedes (J) i Tytan (S).

Rok = 89,97 dnia Z., doba = 58,65 dnia Z, czyli 1,5 doby na rok = 3 doby na 2 lata. Skutkiem szybkiego ruchu orbitalnego i wolnego obrotowego jest „cofanie się” Słońca na niebie w perihelium, stąd ogromne różnice nasłonecznienia poszczególnych długości geograficznych i największa w Układzie Słonecznym dobowa różnica temperatur = 600°C (-170°C do + 430°C).

Badania:

Do 2007 r. znany jedynie z misji **Marinera 10** (3 przeloty w latach 1974-75). Łącznie pokrycie obrazami tylko połowy planety. Wyglądał jak Księżyc – stąd brak zainteresowania przez ponad 20 lat. Od 03.2011 do 04.2015 badany przez orbiter kartograficzny **MESSENGER** (MErcury Surface, Space Enviroment, GEochemistry & Ranging).

Budowa wewnętrzna:

Gęstość 5,43 (Ziemia – 5,52) = anomalnie duża w porównaniu z innymi planetami.

Jądro anomalnie duże, metaliczne (Fe? Fe+Ni?) = 70% masy, 42% objętości, 78% promienia, czyli $r = 1800 - 1900 \text{ km}$ („wielkości Księżycza” = 1737 km), być może wewnątrz stałe, a zewnętrzna warstwa (150 km?) płynna.

Teorie wyjaśniające anomalną gęstość Merkurego:

- na początku tworzenia Układu Słonecznego lokalnie inny skład obłoku protoplanetarnego,
- bliskość Słońca = wiatr słoneczny „wywiał” lżejsze składniki,
- impakt → odparowanie lżejszych pierwiastków,
- impakt → strata („kradzież”) płaszcz.

Termika, magnetyka → przy tych rozmiarach Merkury powinien dawno wystygnąć – a tymczasem jest słabe pole magnetyczne = działa dynamo? Czyli jest płynne jądro zewnętrzne? Tak słabe pole może być tylko magnetyzmem szczątkowym?

Płaszcz: grubości 500 – 600 (700?) km. „Silicate outer shell” = płaszcz + skorupa = 1 płyta (powłoka), bez śladów tektoniki płyt.

Powierzchnia:

zagadkowy przy tak ogromnym jądrze **brak Fe na powierzchni** – najmniej wśród planet typu ziemskiego. Niewątpliwie jest tu mniej tlenków Fe niż na Księżycu,

Stwierdzono spektroskopią IR naziemną (1994) obecność **plagioklazu** lub anortytu.

Skąły: dość duże zróżnicowanie regionalne i genetyczne = **sjenity, labratoryty, anortozyty**, skały ≈ do **brekcji** księżycowych, również **bazalty i dioryty**.

Procesy kształtujące powierzchnię:

Powierzchnia bardzo zniszczona przez **impakty**. Blisko Słońca = duże prędkości przy orbitach eliptycznych = duże energie. Przeciętnie energia impaktu 2 x większa niż na Księżycu, ale krótsze pokrywy wyrzutowe (bo 2 x większa grawitacja). Kratery też bardziej płaskie niż na Księżycu.

Mniejsze pokrywy wyrzutowe = teoretycznie więcej odsłoniętej najstarszej skorupy.

Powinien też występować **regolit**.

Prawdopodobnie był **wulkanizm piroklastyczny**, dający formy podobne do pokryw wyrzutowych.

Typy terenów – 4 rodzaje:

- **heavily cratered terrain** – podobne do łądów Księżyca, na nich duże, stare kratery impaktowe m.in.: Basen Caloris – średnica 1300 km, wielopięścienny (grzbiety do 2 – 3 km), częściowo wypełniony lawą. Datowany (zliczanie kraterów) na ok. 3,6 mld lat (= wiek podobny do mórz księżycowych). Fale sejsmiczne obiegły cały glob i zogniskowały się na antypodach, tworząc „obszar chaotyczny” (uskoki, rowy tektoniczne – tektonika blokowa) = tzw. epizod Caloris.
- **intercrater plains** – 1/3 powierzchni = łagodne, faliste równiny, dużo małych kraterów o średnicach do 15 km,
- **smooth plains** – podobne do mórz księżycowych, ale jaśniejsze = dawne wulkanity? (są też podejrzenia młodego wulkanizmu). Ale mniej Fe i Ti niż na Księżycu – może zamaskowane regolitem? Może to tylko pokrywy wyrzutowe? (bo są głównie obok basenu Caloris).
- **hilly and lineated terrain** = antypody basenu Caloris (tektonika blokowa po impakcie Caloris?).

Historia geologiczna Merkurego:

- formowanie ok. 4,5 mld lat temu – całkowita dyferencjacja na jądro i płaszcz, zwolnienie początkowo dużo szybszych obrotów na skutek sił pływowych (→ siatka merkuriańska?)
- intensywne bombardowanie = „heavily cratered terrain” - najstarszy krater Tołstoja, potem powstanie Basenu Caloris i jego antypodów (pokrywy wyrzutowe Caloris = główny „reper stratygraficzny” Merkurego),
- wylewy lawy (dno basenu Caloris) = powstanie nowej skorupy,
- lżejsze bombardowanie (trwa do dziś) = powstanie „intercrater plains”,
- stygnięcie → kurczenie (2,5 mld lat temu ?, gdzieś między 2 a 4 mld ?) → skarpy (uskoki odwrócone ?),
- wypływy lawy (?) → powstanie „smooth plains” (geneza niejasna),
- bombardowanie przez mikrometeority i małe meteority = tworzenie regolitu.

Stratygrafia (od najstarszych 1 do najmłodszych 5):

- 5 – okres kuiperowski (impakt...),
- 4 – okres mansuryjski (impakt...),
- 3 – okres kaloryjski – oprócz basenu Caloris i „antypodów” – gładkie dna wielu innych basenów (wylewy law?),
- 2 – okres tołstojski – początek = basen impaktowy o średnicy 500 km na półkuli S,
- 1 – okres przedtołstojski = okres wczesnej, kompletnej dyferencjacji, powstanie skorupy,

Tektonika.

Zachowane są formy starsze od Caloris (nie tną go): „liniowe twory”, przeważnie N-S, NW-SE i NE-SW = tzw. „**siatka merkuriańska**”. Jej możliwa geneza: Merkury obracał się początkowo

szybko (co 20 godz., może nawet 8?) i był rozplaszczony przez siłę odśrodkową. Potem zwolnił obroty na skutek działania sił pływowych („despining”) i zmienił kształt na kulisty, co spowodowało dopasowanie układu naprężeń. Takie zwolnienie obrotów to równocześnie podgrzanie planety o ok. 100°C. Nowsze opracowania (na podstawie misji MESSENGER) nie wspominają o siatce merkuriańskiej.

Są też młodsze **uskoki** przecinające całą powierzchnię Merkurego – szereg zakrzywionych urwisk i skarp („Rupes”) – związane z późniejszym stygnięciem i kurczeniem się całej planety. Mają setki km długości i do 3 km wysokości. Wiązane są z kompresją = **uskoki odwrócone**. To kurczenie niewielkie – 0,1% powierzchni = 1-2 km promienia. . To odpowiednik „ziemskiej” hipotezy kontrakcji (E.de Baumont 1829), dla Ziemi dawno zarzuconej. Ale Merkury to 1 płyta („silicate outer shel”) = może to właściwy model dla takich planet?

„**Epizod Caloris**” (Caloris related events): koncentracja fal sejsmicznych po impakcie Caloris, które po obiegnięciu całego globu utworzyły grzbiety, skarpy i rowy tektoniczne na antypodach.

MESSENGER odkrył duży promienisty system rowów tektonicznych w centrum Caloris Basin - **Pantheon Fossae**, oraz dużą ilość skarp uskokowych i grzbietów zmarszczkowych, czyli potwierdził przewagę tektoniki kompresyjnej.

TEKTONIKA PLANET – 7 (OGUN)

Wykład 7: Wenus (1) - geotektonika

Orbita 0,723 AU = 108 mln km, prawie kołowa, rok = 225 dni, doba 243 dni (doba dłuższa od roku!). Długo przypuszczano, że doba ma 4 dni (tyle trwa „superrotacja” chmur). Rotacja Wenus w przeciwną stronę niż innych planet (na zachód).

Badania naziemne: spektroskopowe → atmosfera CO₂, chmury H₂SO₄.

Naziemne badania mikrofalowe (1956-58) = średnia temperatura powierzchni 740 K = 467°C (!!!).

Radarowe (Arecibo) badania powierzchni od 1960 – rozdzielczość początkowo rzędu setek km, później ok. 1km → obrazy pokryw lawowych i wulkanów.

Sondy kosmiczne. Ok. 30 misji od 1961, najważniejsze to (Venera - ZSRR, reszta USA):

- 1970 – Venera 7 – I lądowanie na innej planecie – t = 475°C i p = 90 bar,
- 1975 – Venera 9 i 10 – lądowniki – I obrazy powierzchni, analizy skał.
- 1978 – 1992 – Pioneer 15 = Pioneer Venus Orbiter (PVO) + PVMultiprobe: I radarowy obraz powierzchni planety z orbity,
- 1981 – Venera 13 i 14 – lądowniki (panoramy) + analiza składu skał,
- 1983 – Venera 15 i 16 – radarowa mapa o rozdzielczości 1-2 km,
- 1989 – 94 – **Magellan**: orbiter radarowy, max. rozdzielczość 150 x 150 m.
1 - badanie powierzchni,
2 - pomiary wysokości – pionowo (altymetria radarowa) o dokładności 30 m,
3 - radiometr o dokładności 2 K.

Zadania:

- radarowe obrazy powierzchni z rozdzielczością ok. 500 m,
- mapa topograficzna z rozdzielczością poziomą 50 km, pionową 100 m,
- mapa grawimetryczna z rozdzielczością 700 km i dokładnością 1 – 2 mgal.,
- „rozwińnięcie zrozumienia struktury geologicznej planety...”
- Obecnie: **Venus Express** (ESA) – na orbicie od 04.2006, badania głównie atmosfery i termiki.

Rozmiary: r = 6052 km (95% Z.), masa 0,814 Z. = grawitacja 0,903 Z. Gęstość: 5,24 = w normie,

leży „na linii planet typu ziemskiego”.

Atmosfera - „pierwotna” = 96% CO₂, 3,5% N₂. Śladowo: SO₂, O₂, H₂O, CO i in., m. in.

Chmury = kropelki kwasu siarkowego (tworzy się z SO₂ i H₂O pod wpływem UV), cząsteczki S, chmury na wysokości > 30 km, poniżej chmur jest 0,1 – 0,4% pary wodnej i 60 ppm wolnego tlenu. Te chmury powodują „galopujący” efekt cieplarniany (runaway greenhouse effect) – pod pokrywą chmur panują bardzo wyrównane temperatury – średnio +482°C = najgorętsza z planet. (Merkury średnio +170°, a max. +430°C). Superrotacja chmur co 4 dni – niejasny mechanizm (bada go Venus Express). Wiatry na powierzchni 13 km/h, na 45 km – 175 km/h, na 50 km – 360 km/h. Stwierdzono też silne prądy pionowe i błyskawice.

Ciśnienie – 92 x większe niż na Ziemi = jak w morzu na głębokości 1 km.

Budowa wewnętrzna

Geosfery: skorupa, płaszcz, jądro = podobna do Ziemi, ale:

Litosfera – chłodniejsza i grubsza niż na Ziemi. Brak recyklingu litosfery. Możliwe, że jest za mało wody w litosferze i płaszczu (→ brak plastycznej astenosfery), przez to mało ruchliwe magmy. Ale przecież są liczne wulkany i przejawy bardzo płynnych law. Pary H₂O w atmosferze 100 000 x mniej niż na Ziemi, ale deuteru w górnych warstwach atmosfery jest 150 x więcej niż na Ziemi = było dużo więcej wody? Brak wody wynikiem efektu cieplarnianego?

Skorupa do 160 km grubości, krzemianowa, skały podobne do bazaltów den oceanicznych.

Brak stref subdukcji, ale są plamy gorąca (hot-spots).

Płaszcz o miąższości ok. 3000 km, cięższe krzemiany, z większą zawartością metali.

Jądro o r = ok. 2940 km, Fe-Ni, zapewne jest płynne jądro zewnętrzne (?). Ale mimo to brak pola magnetycznego – być może rezultat prawie całkowitego braku rotacji = brak efektu dynamo? Może też w jądrze być za mało FeS, co może powodować podwyższenie temperatury topnienia i brak płynnego jądra zewnętrznego. Jądro mniejsze od ziemskiego (Wenus - 48% Ziemia - 54% promienia).

Termika: brak ustalonych poglądów - jest teoria okresowego „przegrzewania się” Wenus. Możliwy wpływ atmosfery (efektu cieplarnianego, powodującego brak wody m.in. w magmach) na tektonikę globalną.

Powierzchnia - podstawowe typy terenów

ok. 80% powierzchni to „lava plains” = pokrywy lawowe (1, 2):

- 1 – „**Rolling plains**” = faliste równiny – ok. 65% powierzchni = „uplands” (wyżyny),
- 2 – „**Lowland Plains**” = niziny – ok. 20% powierzchni = „planitia”, nisko położone obszary, stosunkowo monotonne, mało aktywne wulkanicznie i tektonicznie,
- 3 – „**Highlands**” = wyżyny – ok. 8% (10% ?, 15% ?) powierzchni.

„Highlands” tworzą 4 Terrae („ziemie” = kontynenty?):

- 2 duże „kontynenty” = Ishtar Terra (na niej wyniesiony płaskowyż Lakshmi Planum) i Aphrodite Terra, oraz
- 2 mniejsze = 3. Lada Terra i 4. złożony z Beta, Phoebe i Themis Regiones.
- Terrae mogą być rozwinięte nad konwekcyjnymi prądami wstępującymi (upwellingami).
- Często występują na nich duże wulkany tarczowe.
- Highlands bywają miejscami otoczone przez doliny (Chasma-te), zwykle uważane za ryftowe, tworzące systemy do 9 000 km. długości.

TEKTONIKA PLANET – 8 (OGUN)

Wykład 8: Wenus (2) - Czynniki kształtujące powierzchnię

Duża planeta + atmosfera = liczne czynniki endogeniczne i egzogeniczne.

Głównie: 1 - wulkanizm, 2 – tektonizm, 3 – impakty, 4 - osuwiska, 5 - procesy eoliczne.

Czynniki egzogeniczne: impakty, osuwiska, procesy eoliczne.

Impakty. Wpływ ochronny atmosfery powoduje deficyt małych kraterów (< 15km), ale w ogóle „za mało” kraterów: są ogółem 963 kraterów impaktowe rozrzucone losowo, czyli cała powierzchnia jest młoda i równolegowa (~800 mln lat ?).

Przemodelowywanie zboczy przez procesy grawitacyjne = ruchy masowe (osuwiska).

Procesy eoliczne. Wiatry przy powierzchni są słabe (13 km/h), ale wielka gęstość atmosfery.

Najczęściej występują smugi za przeszkodami. Skąd pochodzi „piasek”? Utwory piroklastyczne?

Czynniki endogeniczne: wulkanizm i tektonizm.

Wulkanizm – bardzo intensywny, choć brak bezpośrednich dowodów współczesnej aktywności.

Równiny wulkaniczne zajmują 85% powierzchni, występują na wysokościach od –1,5 km do + 2 km. Mają setki km szerokości i długości.

Strumienie lawy długości od kilku km do setek km, zaczynają się od wulkanów, spękań, lub depresji, choć czas, a także małe wulkany - tarcze i stożki.

Kanały lawowe długości setek do tysięcy km, zwykle są nierozgałęzione. Dzielą się na:

- „Sinous Rilles” (kręte rowki, rzeczki) – wypływające z określonego źródła, zwężające się i spływające w dół. Mają głębokie, pojedyncze koryta, zwykle setki km długości, szerokość – 1-2 km. Często występują wokół koron.
- „Canali” – zachowane głównie na terenach o obniżonym reliefie, płytkie – kilkadziesiąt m głębokości, 3-5 km szerokości, długość 500 – 7 000 km. Mają zakola, ławice, podcięcia brzegów i „starorzecza”. Geneza – niejasna. Bardzo płynne lawy? (krzemianowe zbyt szybko gęstnieją).

Wulkany - podział wg. wielkości i morfologii:

- **Małe** = < 20 km
 - małe wulkany tarczowe,
 - małe wulkany stożkowe
 - małe kopuły.
- **Średnie** = 20–100 km:
 - wulkany „płatkowe”- (anemone (Petal) v.) związane z erupcjami szczelinowymi,
 - wulkany typu „kleszcza” (tick v.), mają promieniście ułożone grzbiety i dolinki,
 - kopuły (domes) – zwykle okrągłe, mają stosunkowo strome brzegi i płaski wierzchołek.
 - Racuchy (pancake) – płaskie, okrągłe, o stromych krawędziach. Wynik erupcji lepkiej lawy na płaskiej powierzchni?
- **Wielkie:** 100 – 600 km:
 - wulkany tarczowe, o wysokości 3 – 5 km nad otaczający teren, mają widoczne promieniste wypływy lawy. Występują na wzniesieniach wulkanicznych (volcanic rises) i na przecięciach struktur tektonicznych,
 - kaldery (Paterae) – owalne depresje, wyglądające jak kraterów impaktowe bez obrzeża.

Tektonika Wenus.

Geotektonika – 3 podstawowe **typy terenów** (odpowiedniki kontynentów i basenów na Ziemi).

- **Wulkaniczne wzniesienia** (Volcanic Rises) - kopulaste, tektonika ekstensyjna, wulkanizm i anomalie grawimetryczne świadczą o tym, że mogą być rozwinięte nad głęboko zakorzenionymi prądami konwekcyjnymi w płaszczu.
- **Płaskowyże** (Plateau highlands), nieco niższe od V.R., starsze od nich, zwykle pokryte obszarami CTR (tesserae). Geneza:
 - zbieżne zstępujące prądy konwekcyjne → nad nimi grubienie skorupy,
 - intruzje i ekstruzje magmy → nadtapianie i cienienie skorupy, potem stygnięcie i obniżanie.
- **Niziny** (Lowland plains) - odpowiednik basenów oceanicznych? Ogromne wylewy law. Czasem uważane za miejsca pograżania płaszczu. Na nich mało wulkanów, kompresyjne grzbiety (= skrócenie?), spore ujemne anomalie grawimetryczne.

Wielkie struktury tektoniczne (100 do >1000 km). Związane głównie z procesami magmowymi – korony, pajęczaki i Novae, oraz tessery (CRT).

Korony (Corona, l.m. Corona-ae). Kołowe struktury o obwodzie z wyniesionych koncentrycznych grzbietów i niecek oraz skarp. Wewnątrz często ślady aktywności wulkanicznej i wczesnego pęknięcia. Poza obwodem zewnętrznym – promieniste rowy tektoniczne. Wnętrze obniżone lub wyniesione względem otoczenia. Rozpoznano ok. 360 koron, o średnicach 75 – 2000 km (średnio 250 km). Prawdopodobnie powierzchniowy przejaw wznoszenia się, stygnięcia i opadania pióropuszy płaszczu. Aktywność wulkaniczna sięga do 4 długości promienia korony od środka. Rozwój – zapewne 4 etapy:

- 1 - ekstensja podłoża nad pióropuszem płaszczu = powstanie zespołu małych rowów i zrębów tektonicznych,
- 2 - wypełnienie rowów lawą,
- 3 - obniżenie terenu (zapadnięcie komory magmowej?) powodujące powstanie spękań koncentrycznych i radialnych,
- 4 - późniejsze spękania i radialne uskoki normalne.

Pajęczaki (Arachnoid-s). Kołowe (eliptyczne) struktury złożone z centralnej kopuły lub depresji, otoczonej gęstą siatką radialnych i koncentrycznych struktur liniowych (brak grzbietów i rowów?). Rozpoznanych 259, średnio – 115 km średnicy. Wynik iniekcji magmy na małych głębokościach? **Nowe** (Nova-ae). Podobne do pajęczaków, ale złożone głównie ze struktur radialnych. Występują głównie na kopulastych wypiętrzaniach. Wczesne stadia formacji koron? Znanych około 50, średnio 190 km średnicy.

Tessery (Tessera-ae) = **CRT** (Complex Ridged Terrain). Siatka przecinających się 2 lub więcej zespołów liniowych grzbietów i niecek. Najstarsze partie skorupy Wenus? Wszędzie podobne następstwo wiekowe:

- 1 - starsze grzbiety = stosunkowo intensywne faza kompresyjna o szerokim zasięgu;
- 2 - młodsze struktury ekstensyjne, stosunkowo słabsze od 1:
 - a – równoległe uskoki zrzutowe tworzące rowy i zręby tektoniczne (ekstensja),
 - b – ortogonalne zespoły spękań i lokalnych uskoków powstające w warunkach relaksacji naprężeń w grubiejszej litosferze.

W momencie powstawania były to struktury ograniczone do cienkiej warstwy powierzchniowej, podścielonej warstwą o małej lepkości wewnątrz litosfery lub skorupy (astenosfera? soczewki astenosfery?). Prawdopodobnie powstawały w wierzchniej warstwie skorupy o grubości 1 – 10 km, przy gradiencie geotermicznym 400–1500 K/km (bardzo wysoki!! Na Ziemi 20 - 40, max. 70, średnio ok. 25 K/km). Taki gradient powinien powodować częściowe stopienie skał już poniżej 1 km! W takich warunkach powinien być bardzo silny wulkanizm – a brak go.

Ryfty (Chasma-te). Interpretowane jako ekstensyjne = podobne do ziemskich ryftów. Mają tysiące km długości. Nieliczne uznawane są za początki stref subdukcji. Różnica względem Ziemi - brak następczych basenów = niepełny rozwój ryftingu?

Pasma górskie - góry o budowie fałdowo-uskokowej (skibowej?). Podobne do ziemskich – powstały w wyniku kompresji, potem był nawet postorogeniczny wulkanizm i późniejsza relaksacja i ekstensja (są rowy tektoniczne równoległe do fałdów – np. Maxwell Mts.) To są młode góry – prawdopodobnie mają < 25 mln lat. Geneza trudna do wytlumaczenia bez tektoniki płyt.

Mniejsze struktury:

spękania i uskoki – np. wokół wielkich wulkanów występują radialne i koncentryczne rowy tektoniczne = wynik ugięcia litosfery lub opróżniania komór lawowych. Ze spękaniem związana wielka ilość dajek (intruzji żyłowych).

Grzbiety zmarszczkowe (wrinkle ridges) o genezie kompresyjnej. W poszczególnych wystąpieniach mają dość regularne odstępki (spacing). Generalnie grzbiety węższe i „gęstsze” niż na innych planetach (= mała grubość warstwy fałdowanej?). Do ich powstania wymagane globalne skrócenie rzędu 0,1% promienia.

Rozstęp struktur (spacing) – duża ilość struktur liniowych występuje w regularnych odstępach 5 – 20 km, co wskazuje na cienką (osłabioną?) litosferę grubości kilku km. Może to struktury reliktove? Później - spadek gradientu geotermicznego = zgrubienie litosfery?

Brak płyt litosfery = **brak tektoniki płyt**. Prądy konwekcyjne obecnie – przy grubej litosferze – zapewne nie osiągają powierzchni – zamiast pasm konwekcji (jak na Ziemi) występują jedynie plamy gorąca (hot-spots).

Historia Wenus - zapewne powstała jak reszta planet, > 4 mld lat temu na skutek akrecji, uległa dyferencjacji na geosfery i przeszła przez okres Heavy Bombardment. Brak informacji o następnych > 3 mld lat. Prawdopodobnie potem - grubienie litosfery i zanik ruchu płyt (nie wiadomo, co było przyczyną a co skutkiem). Spowodowany zanikiem tektoniki płyt brak recydlingu CO₂ spowodował galopujący efekt cieplarniany, aż do odparowania H₂O, a także brak H₂O w magmach, stąd ich małą prężność i ruchliwość.

Najstarsze zachowane fragmenty to Crustal Plateaus na płaskowyżach - wynik wczesnej ekstensji w jeszcze cienkiej, gorącej skorupie (obszary tesserae = CRT). Potem:

wyniesienia wulkaniczne nad pióropuszcami płaszczą pod znacznie już grubszą litosferą. To wynik zmiany typu konwekcji? Brak form przejściowych = zmiana była gwałtowna. Gwałtowny spadek termalnej aktywności tektonicznej 300-500 mln lat temu (800? 300? 1 mld?) = „resurfacing” - gwałtowne odnowienie całej powierzchni.

Stratygrafia:

A. Basilevsky i J. Head 1994 – 95 opracowali stratygrafię dla okresu po „resurfacingu” = dla ostatnich kilkuset mln. lat. Na podstawie sukcesji pokryw lawowych, deformacji tektonicznych i zliczania gęstości kraterów wyróżnili (od dołu):

- 0 – **Pre-Fortunian** Period = 80 - 90% historii Wenus, być może małe fragmenty utworów tego wieku są wbudowane w tessery (CRT),
- 1 – **Fortunian** Period – okres silnych deformacji tesser (CRT), zniszczenie całej poprzedniej morfologii, po nim:
- 2 – **Guineverian** Period – okres intensywnego rozwoju pokryw lawowych (plains volcanism) = odnowienie większości powierzchni Wenus, w tym okresie 4 etapy deformacji pokryw lawowych:
 - a – **Sigrun** Group – rowy tektoniczne = ekstensja,
 - b – **Lavinia** Group – liczne grzbiety = przejście z ekstensji do kompresji,
 - c – **Rusalka** Group – liczne grzbiety „wrinkle ridges” = kompresja,
 - d – **Atla** Group – lokalne budowle wulkaniczne, wylewy law związane z koronami i początek tworzenia ryftów,
- 3 - **Aurelian** Period – najmłodszy – charakterystyczne impakty z ciemnymi otoczkami – wiek od ok. 30 – 50 mln lat do dziś. Intensywny ryfting, kontynuacja wulkanizmu o mniejszej intensywności.

Ponieważ ta stratygrafia obejmuje tylko 10 – 20% wieku Wenus, to może jest to tylko jeden cykl, a takie cykle powtarzały się wielokrotnie? (hipoteza cyklicznego przegrzewania skorupy Wenus).

TEKTONIKA PLANET – 9 (OGUN)

Wykład 9: Mars (1)

Orbita 228 mln km = 1,52 AU (ekscentryczność 9,3%). Rok = 687 dni = 1,88 roku ziemskiego (Z). Doba = 24,6 godz. = 1,026 doby Z. Nachylenie osi 25,19° (Ziemia – 23,45°), stąd pory roku. Ekscentryczność orbity powoduje duże różnice nasłonecznienia między półkulami. Duże wahania nachylenia osi, a więc duża zmienność warunków klimatycznych. Temperatury: min. –140°C, max. + 20°C (a nawet wyższe), średnio – 63°C.

Atmosfera: 95% CO₂, reszta N₂, oraz: Ar i in. (0,13% O₂, 0,03% H₂O). Ciśnienie 7 mb (duże wahania – 25%, w zależności od ilości CO₂ wiązane w czapach polarnych, lub uwalnianego).

W przybliżeniu: gęstość 1% atmosfery Ziemi, co na Ziemi odpowiada wysokości 32 - 35 km.

Promień średnio 3388 km (53% Z.). Masa 0,108 Z. Gęstość 3,94 g/cm³ (0,71 Z., ale 1,18 Księżycy). Grawitacja 0,38 g.

Obserwacje teleskopowe. Najlepsza rozdzielczość dawniej ok. 100 km = widoczne tylko główne jednostki (jasne – ciemne). Najlepsza osiągnięta rozdzielczość HST = tylko ok. 20 km.

Widoczne sezonowe zmiany kolorów = pory roku? (podejrzewano wegetację). Problem „kanałów”: Schiaparelli (do 1892) – „canali”(naturalne), Lowell – kanały (sztuczne – irygacyjne?).

Spektroskopia naziemna 1960-70 wykazała, że ciemne pola to głównie skały wulkaniczne.

Misje badawcze.

1960 – 64 – 5 nieudanych misji ZSRR, 1 – US,

14.07.1965 – Mariner 4 (US) – I przelot w odległości 9920 km – 22 obrazy. Potwierdził atmosferę, wykrył pole magnetyczne.

1969 – Mariner 6 i 7 (US) – przeloty na ok. 3500 km, >200 obrazów, skład atmosfery, pomiary temperatury,

1971 – Mars 2 i 3 (ZSRR) – lądowiki. Mars 2 rozbił się, Mars 3 – 2.10.71 – I lądowanie.

1975-80 (78) – **Viking 1 i 2** – orbiter i lądowiki US. Lądowiki = panoramy, analizy gruntu. Orbiter = 52 000 obrazów.

1996 - 2006 **Mars Global Surveyor** (MGS). 2 kamery – szeroko- i wąskokątowa. Obrazy kolorowe średniej rozdzielczości (ok. 230 m), czarno-białe o rozdzielczości do 1,4 m.

Inne instrumenty MGS:

MOLA - Mars Orbiter Laser Altimeter – dokładność w pionie 30 m, 1998-99 zrobił 27 mln. pomiarów wysokościowych – z nich mapa topograficzna,

TES - Thermal Emission Spectrometer – IR, dane do mapy składu powierzchni,

M/ER - Magnetometer/Electron Reflectometer - badania budowy wewnętrznej,

RS - Radio Science – Ultra-stable Oscillator (USO) = grawimetria dopplerowska.

2001 – **Mars Odyssey** (MO) – spektroskopowe badania składu. Instrumenty:

THEMIS = Thermal Emission Imaging System – rozpoznawanie minerałów,

GRS = Gamma Ray Spectrometer – badanie występowania 20 pierwiastków,

MARIE – Mars Radiation Environment Experiment – badanie promieniowania.

„**Łaziki**” marsjańskie - Mars Pathfinder, Spirit i Opportunity, Curiosity. Zdjęcia stereoskopowe naziemne, analizy skał (mały zasięg).

Trwają misje orbiterów, w tym **obrazujących**: **MO**, **ESA Mars Express** (od 2003), **NASA Mars Reconnaissance Orbiter** (MRO, od 2006), **MAVEN** (od 2013) i **ExoMars** (od 2016).

Budowa wewnętrzna

Jądro - szacunki promienia jądra na podstawie momentu bezwładności (kołysanie osi): 1200 – 2400 km (35-71% promienia), zależne od przyjętego składu: Fe (mniejsze) lub FeS.

Po przyjęciu ograniczeń wynikających ze składu meteorytów (różne stosunki Mg:Fe) promień 1450 – 1700 km (42-50% promienia) dla modeli „ciepłych”, lub 1300 – 1450 km (38-42%) dla modeli „zimnych”. Czyli jądro stosunkowo niewielkie (Ziemia 54%).

Jądro chyba stałe – brak efektu dynama, bo pola magnetyczne tylko szczątkowe (brak globalnego). MGS MOA stwierdził pasma namagnesowane w przeciwnych kierunkach, podobnie jak na Ziemi w stosunkowo młodej skorupie oceanicznej, ale ograniczone do części południowej półkuli Marsa, czyli najstarszej skorupy, raczej podobnej do kontynentalnej. Koncepcje:

- dawno temu na Marsie była tektonika płyt? (ale czemu na „kontynentach”?),
- może Mars tylko ekspandował i popękał, a wtedy „nowa skorupa” w spękaniach musiała się namagnesować odwrotnie (jak w pociętym magnezie sztabkowym).

Możliwe częściowe stopienie od wielkiego impaktu, powodujące rozmagnesowanie części północnej (dynamo już wtedy nie działało).

W 2005 stwierdzono słabsze anomalie magnetyczne również na N równinach, co przemawia za dawną tektoniką płyt.

Wykonana w 2011 dokładna mapa grawimetryczna Marsa i analiza odkształceń jego powierzchni na skutek pływów przemawia jednak za istnieniem **zewnętrznego stopionego jądra** (2016).

Płaszcz stosunkowo gruby (bo małe jądro). Modelowanie wskazuje, że konwekcja w takim płaszczu powinna dawać duże pióropusze, rozchodzące się na dziesiątki stopni, a w skrajnych przypadkach tylko 1 wielki pióropusz.

Z badania próbek o składzie zbliżonym do płaszcza Marsa w warunkach wysokich temperatur i ciśnienia wynika, że budowa płaszcza jest zapewne 2 – 3 warstwowa.

Litosfera – zapewne dość cienka – miąższość wyliczona na podstawie ugięcia litosfery pod obciążeniem wulkanami wynosi od 50 km dla Alba Patera do 150 km dla Olympus Mons.

Skorupa o grubości średnio ok. 50 km – pod północnymi nizinami 40 km, pod południowymi wyżynami 75 km. Całkowicie skompensowana izostaticznie (prócz najmłodszych części: prowincji wulkanicznych Tharsis i Elysium, impaktowego basenu Isidis oraz regionu Tempe Terra).

Skąły bazaltowo-andezytowe.

Dwa główne rodzaje terenów = wyraźna asymetria ich rozmieszczenia – nieco podobnie do Ziemi. Przyczyny niejasne:

- gigantyczny impakt na początku (jak powstanie Księżyca), lub
- jakaś forma tektoniki płyt, teraz zamarłej.

Te tereny to:

- 1 – południowe **wyżyny** = ancient cratered highlands = **Southern Highlands**,
- 2 – północne **niziny** = low-lying plains = **Northern Lowlands**,

oddzielone od siebie „globalną skarpą” o wysokości średnio 4 km (ale szerokości kilkuset km = o bardzo małym spadku).

Na te 2 rodzaje terenów „nałożone” 2 **prowincje wulkaniczne** - Tharsis i Elysium.

Wyżyny - Ancient cratered highlands - zajmują 1/3 planety, głównie na półkuli S, wysokość zwykle +1 do +4 km nad średni promień planety, gęstość kraterów impaktowych podobna do łądów księżycowych = podobny wiek (3,8 mld lat?). Ale są różnice: kratery na Marsie silnie zdegradowane (dawna erozja), średnice tylko 5 – 100 km, pokrywy wyrzutowe w postaci izolowanych płatów (rola lodu w podłożu?), na powierzchni liczne doliny rzeczne (?).

Niziny - Low-lying plains - zajmują głównie wyższe szerokości półkuli N, leżą zwykle 1 do 2 km poniżej średniego promienia Marsa. Gęstość kraterów impaktowych 10 – 100 x mniejsza niż na

wyżynach. Kratery także generalnie mniejsze = młodsze (3 mld. lat? 1 – 3 mld.?). Chyba też zróżnicowane jest pochodzenie nizin:

- część to pola lawowe (lava flows) – widać czoła wylewów i ich strukturę powierzchni, występują wokół 2 prowincji wulkanicznych, są pokryte grzbietami zmarszczkowymi „wrinkle ridges” - podobnie do mórz księżycowych,
- większość nie ma na powierzchni widocznych przejawów wulkanizmu, za to są pokryte dziwnymi teksturami i spękaniami (działalność lodu i stożki napływowe dawnych rzek?) Często niziny pokryte są polami wydmowymi.

Prowincje wulkaniczne:

Tharsis („Tharsis Bulge”). Średnica ok. 4 000 km, wysokość ok. 10 km. W centrum 3 duże wulkany o średnicach ok. 400 km i wysokościach 18-27 km: Arsia, Pavonis i Ascraeus, a dalej ku NW – największy: Olympus Mons (550 km, 27 km) – aktywny zapewne jeszcze 100 – 300 mln lat temu. Podobne do tarczowych wulkanów na Hawajach, ale tam mają tylko po 100 km średnicy i 9 km wysokości (od dna oceanu). Na Marsie brak ruchu płyt, a więc możliwy długi rozwój wulkanu w 1 miejscu. Mniejsza grawitacja też ułatwia powstawanie wielkich budowli wulkanicznych. Największy wulkan to właściwie Alba Patera na N od Tharsis, o średnicy 1500 km, ale ma on tylko kilka km wysokości. Zapewne jest zbudowany z popiołów (= piroklastyczny).

Elysium („Elysium Bulge”) – mniejsza prowincja wulkaniczna, ok. 2000 km średnicy, wysokość ok. 5 km.

TEKTONIKA PLANET – 10 (OGUN)

Wykład 10: Mars (2)

Czynniki kształtujące powierzchnię, tektonika, historia.

Woda. 2 rodzaje działalności wody (dawnej):

- 1 – normalna, powolna działalność wód płynących (erozja) zasilanych opadami – jej ślady widoczne są na starych wyżynach S półkuli. To „dendrytyczne doliny” (**Dendritic Valleys**) – normalne rzeki, z dopływami, powiększające się w dół. Są 2 rodzaje: a - długie, kręte, z niewieloma dopływami, b - mniejsze, często dendrytyczne (sieć drenażu rzadsza niż na Ziemi) Ale: nie stwierdzono dotąd osadów rzecznych w tych korytach.
- 2 – ślady katastrofalnych wypływów wody. Na młodszych północnych nizinach, mają ograniczone występowanie. Niejasne pochodzenie: uwalnianie wody z jezior? „ekstremalne ciśnienia artezyjskie”? gwałtowne topnienie wiecznej zmarzliny? To „kanały wypływowe” (**Outflow Channels**) – ogromne, o długości do 2000 km, szerokości 100 km (kilkuset km?), praktycznie bez dopływów, prostoliniowe. Często zaczynają się na obszarach chaotycznych („Chaotic Terrains”) utworzonych przez poprzeczone bloki nad obszarami, z których zapewne gwałtownie uwolniła się woda. Na drodze przepływu spotykane są ślady opływania przeszkód („Teardrop Islands”). Prędkość wody szacowana na do 270 km/h, a wody tyle, że starczyłoby jej na ocean o głębokości 500 m, gdyby wypływy były jednoczesne. Ale z gęstości kraterów impaktowych wynika szeroki przedział wiekowy wypływów. Generalnie nikną one na N równinach, ale tam brak ich osadów. Objętość wody uwalnianej z terenów chaotycznych wydaje się za mała na tak duże przepływy. Wg. wyników MGS – możliwe wielkie powodzie („Megafloods”) na skutek zmian klimatycznych, nawet w ciągu ostatnich 10 mln. lat. Obrazy MGS potwierdzają występowanie dawnych, obecnie suchych **jezior**.

Czy był **ocean**? Jeżeli są „kontynenty” ze śladami rzek i „baseny”, to może i „ocean” na N nizinach? Dopatrywano się śladów linii brzegowej na obrazach z Vikingów, ale obrazy MGS o

lepszej rozdzielczości jej nie potwierdziły - brak form brzegowych (plaż, klifów, tarasów brzegowych). Część dawnych „linii brzegowych” uznano za wychodnie warstwowanych skał. (czyli może jednak środowisko wodne?) Dane z MOLA ukazują półki (szelfy?), ale na różnych wysokościach, a nie na 1 poziomie morza. Powinny po oceanie pozostać skały osadowe: ewaporaty – Vikingi stwierdziły 10-30% soli. Dodatkowy dowód na obecność wody = hematyt wykryty MGS TES. Ale to raczej jeziora, a nie 1 duży ocean.

Gdzie teraz może być woda - hipotezy:

- 1 – nie ma – uciekła w Kosmos,
- 2 – jest w wiecznej zmarzlinie,
- 3 – jest na biegunach (powyżej 80°) w postaci lodu.
Obecnie potwierdzone hipotezy 2 i 3. Ilość wody obecnie istniejącej (w postaci lodu) szacowana jest na 3,2 – 4,2 mln km³ = 1,5 x więcej niż w lodach Grenlandii. Starczyłoby jej na warstwę 33 m = 1/3 proponowanego „oceanu”.
- 4 – Cykliczność okresów wilgotnych? Model „MEGAOUTFLO” - wieczna zmarzlina izoluje wnętrze Marsa – następuje podgrzanie (wulkanizm Tharsis?) → rośnie ciśnienie gazów pod zmarzliną (CO₂, H₂O), po przegrzaniu - gwałtowne uwalnianie się gazów: CO₂ do atmosfery, H₂O tworzy okresowy ocean. CO₂ w atmosferze powoduje efekt cieplarniany, zaczyna funkcjonować normalny obieg wody, ale krótko: deszcze wypłukują CO₂ z atmosfery, słabnie efekt cieplarniany → następny okres chłodny. Okresy ciepłe i wilgotne zapewne są krótkie (1000 – 10 000 lat?), zimne i suche - długie (setki mln lat?).

Mars Odyssey – w 2001 już w I orbicie wykryła bardzo silny sygnał H na powierzchni (= do głębokości 1 m), czyli jest woda, głównie w rejonach biegunów. Co pewien czas na obrazach o wysokiej rozdzielczości stwierdzane ślady podobne do współczesnych wypływów wody.

Impakty. Baseny impaktowe – największy: Hellas = średnica 2 100 km, głębokość 9 km, otoczony wałem o wysokości do 2 km. Basen Argyre - mniejszy.

Kraterzy - na ogół 5 – 50 km, ale są i mniejsze: < 5 km wklęsłe, o lekko spłaszczonym dnie, duże mają płaskie dno (płytsze niż na innych planetach), czasem centralny stożek, większe bywają wielopierścieniowe. Pokrywy wyrzutowe – często jakby z błota – wynik topienia wiecznej zmarzliny?.

Wiatr. Mała gęstość atmosfery, ale wielkie prędkości wiatrów. Burze pyłowe lokalne i globalne (długotrwałe!). Wydmy różnych rodzajów, smugi („wind streaks”), czarne smugi „odwiane” po przejściu trąb powietrznych. Praktycznie prawie cały Mars jest pokryty jednorodnym (wymieszonym, zunifikowanym) materiałem eolicznym, znacznie utrudniającym spektroskopowe badania skał podłoża.

Ruchy masowe – duże osuwiska na zboczach Valles Marineris i niektórych kraterów.

„Osobliwości geomorfologiczne” Marsa: „twarze”, „ruiny” itp. Na ogół są to mesy, rowy tektoniczne i zapadliska genezy glacialnej (termokras?). Zjawisko „inwersji rzeźby” – m.in. dolin „rzecznych” - wynik cementacji osadów wypełniających doliny i eolicznej erozji skał otaczających?

Tektonika

Niezbyt intensywna, przeważają struktury **ekstensyjne**.

Klasyczna koncepcja „**All Tharsis**”, zakłada, że cała tektonika Marsa związana jest jedynie z wypiętrzaniem prowincji wulkanicznej Tharsis - wokół **Tharsis Bulge** rozwinął się szeroki system **promienistych uskoku i rowów tektonicznych** („radial grabens” = struktury ekstensyjne) obejmujący 1/3 planety. Do nich pasuje kierunkiem system dolin Valles Marineris. Za to koncentrycznie wokół wypiętrzenia rozwinęły się **kompresyjne grzbiety zmarszczkowe** („wrinkle ridges”).

Spękania i uskoki normalne występują też tam, gdzie są duże różnice obciążeń skorupy - np.

przez wielkie wulkany (brzegi kalder), oraz w okolicach brzegów basenów impaktowych. Uskoki normalne są postwulkaniczne (starsze uskoki mogły zostać zamaskowane lawami).

Valles Marineris - wielkie doliny o założeniach uskokowych (ryft?) – następnie przemodelowane przez osuwiska i erozję rzeczną. Rozciągają się na E od wypiętrzenia Tharsis Bulge na długości ok. 4 000 km. Na pewno pierwotna geneza dolin uskokowa (ekstensja), potem przemodelowane przez osuwiska i erozję wodną. Etapy rozwoju Valles Marineris:

- 1 – powstanie kilku zapadlisk (depresji) – widoczne w ścianach osady warstwowane,
- 2 – powstanie rowu (założenia tektoniczne), potem wypływ wody (katastrofalny?),
- 3 – przemodelowywanie dolin przez osuwiska i procesy eoliczne.

Struktury **kompresyjne** - rzadsze.

Grzbiety zmarszczkowe („**wrinkle ridges**”) = kompresyjne. Tradycyjne teorie:

- nad głębokimi uskokami odwróconymi,
- fałdowe, klasyczne wyginanie ze ściskania,
- nad płytkimi odkłuciami, być może w obrębie wiecznej zmarzliny

Badania morfologii i radar naziemny nie potwierdzają związku grzbietów z głębokimi uskokami. Raczej są ograniczone do sztywnego materiału równin (do wiecznej zmarzliny?).

Wokół nabrzmiń (np. Tharsis) – koncentryczne grzbiety zmarszczkowe („**circumferential wrinkle ridges**”). Są też podobne grzbiety na nizinach („**Marae ridges**”) – np. na Syrtis Major Planum – powstawały one przy zróżnicowanych kierunkach naprężeń.

South Tharsis Ridge Belt - koncepcja orogenezy hesperyjsko-noachijskiej (F. Anguita et al., 2006). kompresyjne pasmo górskie. Geneza trudna do wyjaśnienia bez tektoniki płyt.

Tektonika płyt na Marsie? Aktualnie nie ma dowodów na jej istnienie, ale dopuszcza się jej działanie w przeszłości, aby wytłumaczyć istnienie pasowych anomalii magnetycznych, bądź wyjaśnić genezę topograficznej dychotomii między półkugami N i S.

Geologiczna historia Marsa

Bardzo stary - zupełnie skompensowany izostatycznie – prócz okolic wulkanów i niektórych basenów impaktowych. Jeżeli był aktywny geologicznie, to dawno.

Wczesna historia = powstanie struktur globalnych:

- 1 – akrecja, dyferencjacja, potem - Heavy Bombardment,
- 2 – utworzenie południowych płaskowyży,
- 3 – wylewy pokryw bazaltowych na północnych równinach,
- 4 – wypiętrzenie Tharsis i początek wulkanizmu,
- 5 – rozwój Valles Marineris,
- 6 – powstanie „Ridged plains” i dolin rzecznych.

Późna:

- 7 - wulkanizm Tharsis i Elysium,
- 8 - katastrofalne powodzie (kanały, osady),
- 9 - wygasanie aktywności Tharsis,
- 10 – późny wulkanizm, wietrzenie.

Stratygrafia: bardzo generalna, na podstawie zliczania kraterów impaktowych. Od dołu:

- **Noachian** = „okres noachijski” – koniec zestalania się skorupy i okres intensywnego bombardowania – tereny silnie zryte kraterami i stare baseny impaktowe (Hellas)..
- **Hesperian** = „okres hesperyjski” – równiny pochodzenia wulkanicznego. Wylewy szczelinowe = tworzenie równin (m.in. Hesperia Planum). Początek wulkanizmu „kominowego” – np. wulkany Elysium (Albor Tholus), starsze wulkany Tharsis. Deformacje skorupy wzdłuż równika = powstanie Valles Marineris. Ogromne powodzie – „zmywanie” powierzchni Marsa.
- **Amazonian** = „okres amazoński” – najmłodszy. Późniejsze wylewy law Tharsis i Elysium

(m.in. Olympus). Osady (wodne, eoliczne) wypełniają część basenów uderzeniowych i pokrywają fragmenty północnych nizin.

TEKTONIKA PLANET – 11 (OGUN)

Wykład 11: Daleki Układ Słoneczny - księżycy Jowisza

Między orbitami Marsa i Jowisza – pas planetoid (Main Asteroid Belt) – dziesiątki tysięcy planetoid poruszających się w przybliżeniu w płaszczyźnie ekliptyki. Ok. 220 ma $r > 50$ km, a największa prawie 500 km. Łączna ich masa = ok. 4% masy Księżyca. 4 mają $r > 200$ km: Ceres 473, Vesta 262, Pallas ~260, Hygiea 215.

Dotąd pas planetoid był rozpoznany przez 3 misje, które badały 6 planetoid:

misja **Galileo** 1989 - 2003 - 951 **Gaspra** 17 x 10 km, - 243 **Ida** 58 x 23 km,

misja **NEAR** 1996 - 2001 - 253 **Mathilde** 66 x 46 km, - 433 **Eros** 33 x 13 km,

misja **Dawn** = I orbiter do 2 planetoid, 2007 – ? (planowana na 9 lat):

- 2011 - 2012 - **Vesta**, 2015 - ? - **Ceres** – do końca misji.

Vesta : 572×557×446 km (spłaszczenie 0,22), $d = 3.46$ g/cm³ = gęstość planety typu ziemskiego, ale za małe rozmiary, przez co nie ma kulistego kształtu i nie może być uznana za planetę karłowatą. Dyferencjacja na geosfery pozwala uznać ją za **protoplanetę**.

Ma metaliczne (Fe-Ni) **jądro** o $r = \sim 110$ km, skalny **płaszcz** oliwinowy i **skorupę**.

Ma opracowaną mapę geologiczną (NASA 2014), na której widoczne są **struktury tektoniczne**: liczne wielkie koncentryczne rowy tektoniczne w regionie równikowym (największa - Divalia Fossa do 20 km szerokości, 465 km długości) i mniejsze, nachylone względem równika, na półkuli N (Saturnalia Fossa, ~ 40 km szerokości, 370 km długości). Prawdopodobnie są to koncentryczne rowy tektoniczne związane z 2 wielkimi kraterami impaktowymi (Rheasilvia i Veneneia). Są to jedne z największych rowów tektonicznych (chasmata) w Układzie Słonecznym.

Ceres: $r = \sim 473$ km, kulista (najmniejszy obiekt w stanie równowagi hydrostatycznej w Układzie Słonecznym ?) = planeta karłowata, ale $d = 2,08$ g/cm³, skalne jądro, płaszcz z lodu wodnego = właściwie lodowy księżyc.

Jak dotąd (2015) ma wykonaną mapę hipsometryczną i numeryczny model terenu, na których widać głównie krater impaktowe.

Misje kosmiczne do dalekiego Układu Słonecznego:

Pioneer 10: 3.03.72 → Jowisz 1.12.73, → (2013 za Pas Kuipera) → poza Układ Słoneczny.

Pioneer 11: 6.04.73 → Jowisz 1.12.74 → Saturn → poza Układ Słoneczny.

Voyager 1: 5.09.77 → Jowisz, Saturn (Tytan), → 2012 poza Układ Słoneczny.

Voyager 2: 20.08.77 → Jowisz, Saturn, Uran, Neptun → poza Układ Słoneczny.

Galileo (NASA + ESA) 18.10.89 → orbiter Jowisza (przeloty obok księżyców).

Cassini-Huyghens (2004 →) – orbiter Saturna, przeloty obok księżyców - głównie radarowe badania Tytana (+ lądownik Huyghens).

„**Układ Jowisza**”: 67 księżyców, z tego 4 duże (3 większe od Księżyca, 1 nawet od Merkurego).

Te 4 – „Galileuszowskie” (1610) to: Io i Europa – „planety” typu ziemskiego, Ganimedes i Callisto – lodowe księżycy.

Io

„Najbardziej niezwykły księżyc w Układzie Słonecznym”. Większy od Księżyca: $r = 1815$ km, gęstość 3,55 (= „planeta typu ziemskiego”), orbita 422 tys. km, „rok” = „doba” = 1,769 doby ziemskiej. Stałe zwrócony tą samą stroną do Jowisza = ma 2 różne półkule: przednią (leading) i tylną (trailing).

Powierzchnia: średnia temperatura – 143°C , ale są „hot spots” (jeziora lawy?). Bardzo kolorowa – żółta, czerwona – to alotropowe odmiany siarki i jej związki. Brak śladów kraterów impaktowych = powierzchnia bardzo młoda (10 mln lat?), aktywna. Widoczne zmiany powierzchni rejestrowane w skali miesięcy.

Intensywny wulkanizm: czynne kilkanaście dużych wulkanów, oraz > 300 otworów wulkanicznych (aktywnych i nie). Rozkład wulkanizmu przypadkowy = chyba brak płyt i innych struktur tektonicznych I rzędu. Widoczne pióropusze wulkaniczne (piroklastyczne?) do 300 km wysokości. Największy wulkan: Pele – kaldera o średnicy 24 km. Wulkany kilku typów: tarcze, kopuły, wulkany szczelinowe, małe stożki i po prostu otwory w powierzchni. Widoczne potoki lawy z małych otworów o długości do 1300 km i pokrywy lawowe z kalder do 700 km. Potoki lawy z czarnych otworów tworzą „rzeki” długości do 200 km. To chyba nie sama siarka? Formy wulkanizmu są charakterystyczne raczej dla wulkanizmu krzemianowego.

Ciepło napędzające wulkanizm jest wynikiem **tarcia pływowego**: rezonans orbitalny między Jowiszem a Europą i Ganymedesem (1:2:4) powoduje sztywne pływy litosfery – na Io jest to cyklicznie przemieszczające się nabrzmienie o wysokości ok. 100 m.

Wnętrze: płaszcz krzemianowy, stopiony, możliwe małe jądro metaliczne? (gęstość wskazuje na podobieństwo do Księżyca).

4 typy terenów: 1 - góry, 2 - równiny, 3 - obszary występowania wulkanów, 4 - pokrywy lawowe. Pochodzenie gór niejasne. Topografia - płasko przy wulkanach, góry i płaskowyże („plateaus”) do 9 – 10 km wysokości. Są przejawy „erozji” – to chyba „podmywanie” ciekłym H_2S , który pod powierzchnią jest pod ciśnieniem.

Tektonika: tylko nieliczne struktury niewątpliwie tektoniczne. Może niektóre skarpy to **uskoki**? Duża rola **zapadlisk** – nad próżniami po komorach wulkanicznych?

Historia: stara, powstała „na miejscu”, początkowo miała „normalny” skład. Uległa dyferencjacji (jest jądro). Tarcie pływowe spowodowało silne przegranie, stopniowo uleciały CO_2 i H_2O , teraz rolę wody pełni siarka.

Europa

$r = 1569$ km, gęstość $3,01 \text{ g/cm}^3$ (= „planeta typu ziemskiego”), orbita 671 tys. km, „rok” = „doba” = 3,55 doby ziemskiej.

Powierzchnia: młoda – prawie brak kraterów impaktowych. Bardzo płaska – różnice wysokości do kilku km. Powierzchnia to lód H_2O .

Równiny poprzecinane różnokolorowymi wstęgami, najbardziej charakterystyczne to: „potrójne pasma”, ciemne pasma i „klinowate pasma” – to nowy lód? (akrecja skorupy?). Geneza pasm - tarcie pływowe (na przemian tensja – kompresja).

Wnętrze. Glob skalno-lodowy, z możliwym małym **jądrem** metalicznym (Fe, Ni). **Płaszcz** skalny lub skalno-lodowy.

Litosfera lodowa – różne szacunki grubości (od 2 do >20 km), pod nią warstwa „gorącego” lodu (konwekcja)? 100 km „miękkiego lodu lub wody”? Nieliczne kratery impaktowe mają centralne stożki, czyli skorupa nie została przebita (dość gruba?). Skorupa nadtapiana w okolicy równika przez tarcie pływowe jest cieńsza niż na biegunach, stąd niestabilna. Cała skorupa bardzo młoda (kilka mln lat?). Astenosfera wodna (= ocean? w nim możliwe życie?).

Tektonika - właściwie wszystkie struktury na powierzchni są tektoniczne i bardzo młode. Globalny system spękań - spękania do 3 000 km. Poszczególne „bloki” skorupy pływają, są poprzecyłane i zrotowane. Między nimi lodowe „erupcje” (lód i materiał skalny?). Lodowe wulkany i gejzery?

Na powierzchni ciemniejsze linie:

- „ciemne pasma klinowate” - wynik naprężeń pływowych = obszary wynoszenia płaszcza?
- „potrójne pasma” - 2 ciemne, w środku jasne, czasem łączą się w „brązowe pasy”,
- „szare pasma” występujące koło bieguna S – stare, bo poprzecinane przez wszystkie inne.

Te pasma to strefy akrecji nowej skorupy. Brak wyraźnych odpowiedników stref subdukcji.

Modelowanie wskazuje, że powinny być uskoki przesuwcze: na N półkuli lewoprzesuwcze, w okolicy równika „mieszane”, na S półkuli prawoprzesuwcze. Taki układ występuje, ale obecnie jest skrzyżony o ok. 30° – to wynik przesunięcia lodowej skorupy? Geneza przesunięcia niejasna (impakt?).

Ganimedes

Największy księżyc w Układzie Słonecznym – większy od Merkurego, 3/4 Marsa, $r = 2634$ km, masa 2,5% Ziemi, gęstość $1,94 \text{ g/cm}^3$ (= lodowy księżyc), orbita 1070 tys. km, „rok” = „doba” = 7,154 doby ziemskiej.

Powierzchnia: bardzo jasna – najciemniejsze obszary jaśniejsze od lądów księżycowych. Są kratery impaktowe, czyli starsza niż Io i Europa. Kratery – od granicy rozdzielczości (< 1 km) do setek km – ale niewiele ma > 60 km. Są też „utwory krateropodobne” 50 – 400 km, płaskie, bez centralnych depresji – tzw. „palimpsests” („phantom craters”).

Są **2 rodzaje terenów:** ciemne i jasne.

Ciemne (40% powierzchni), silnie zryte kraterami stare obszary („cratered ice fields”). Na przedniej półkuli duży ciemny obszar o średnicy 3200 km (Galileo Regio). Na ciemnych obszarach rowkowane depresje podobne do zaoranych pól, geneza niejasna.

Jasne (60% powierzchni), pokryte bruzdami „grooved terrains” (sulcus) – bruzdy i ich wiązki długości do ponad 100 km i szerokości kilkudziesięciu km. Grzbiety „groove ridges” do wysokości 700 m i szerokości kilku km. W obrębie jasnych terenów:

1 - równiny (ice volcanic plains),

2 – góry (ridged ice mts.),

3 – bruzdy (deep furrows),

4 – baseny (smooth broad basins).

Typy 2 - 4 pochodzenia tektonicznego.

Wnętrze: głównie lód i krzemiany (po połowie).

Jądro – skalne?. Może małe jądro metaliczne? Gęstość < 2 na to nie wskazuje, ale Galileo odkrył własne pole magnetyczne Ganimedesa (I księżyc z magnetosferą!), wtedy r jądra metalicznego może wynosić 200 – 650 km. Ale może pole magnetyczne to efekt warstwy słonej wody pod skorupą (ocean?).

Płaszcz lodowy, ok. 50% promienia.

Skorupa – gruba, z lodu wodnego, może pod skorupą warstwa słonej wody?

Historia: powstał „na miejscu”, akrecja zakończona ok. 4,5 mld lat temu. Stopienie, dyferencjacja na lód i krzemiany, zakończona ok. 4 mld lat temu.

Tektonika: „Rowkowane tereny” = procesy podobne do tektoniki płyt? (poziome przemieszczanie fragmentów skorupy?). To głównie ryfting: uskoki normalne i rowy wypełnianie przez „wulkanizm lodowej papki” (ekstensja).

Callisto

Duży księżyc: $r = 2400$ km, gęstość $1,83 \text{ g/cm}^3$, orbita 1883 tys. km, „rok” = „doba” = 16,69 doby ziemskiej.

Powierzchnia: najciemniejszy z 4 księżyców galileuszowskich, ale i tak 2 x jaśniejszy od Księżyca, powierzchnia silnie zryta kraterami, choć stosunkowo równa; kraterów więcej niż na Ganimedesie = dłuższa historia geologiczna? Brak jakiegokolwiek aktywności wewnętrznej od powstania?

Basen **Valhalla:** struktura wielopierścieniowa (impakt), środek jasny, średnica 600 km,

koncentryczne pierścienie do 2 000 km od środka, to uderzenie w dość cienką skorupę pokrywającą coś podobnego do cieczy. Jest też 7 innych struktur wielopierścieniowych, m.in.: Asgard.

Wnętrze: podobne do Ganimedesa, ale mniejsza gęstość = więcej wody (lodu). Udział skał wzrasta w głąb?

Historia: podobna do Ganimedesa, ale „oszczędniejsze wydzielanie ciepła” – możliwe przyczyny:

1 – nieco mniejsze rozmiary, czyli mniej pierwiastków promieniotwórczych i łatwiejsze stygnięcie,

2 – mniejsze siły pływowe – bo brak dużych księżyców na zewnątrz,

3 – mniejsza przeciętna energia impaktów (bo prawie 2 x dalej od Jowisza niż Ganimedes).

Tektonika: jedynie wokół basenu Valhalla – wychylone bloki.

TEKTONIKA PLANET – 12 (OGUN)

Wykład 12: Daleki Układ Słoneczny - księżyce Saturna, Urana i Neptuna

Układ Saturna = pierścienie + księżyce.

Znane 62 księżyce o średnicach od kilku km do wielkości Merkurego (Tytan). 9 największych odkrywano teleskopowo od 1655 r, resztę odkryły Voyagery. Wszystkie prócz 2 (Hyperion i Phoebe) obracają się synchronicznie (doba = rok), czyli można wyróżnić na nich 4 półkule: zwrócone do i od Saturna, oraz przednią (leading) i tylną (trailing) względem ruchu.

Nie ma żadnej zależności między ich wielkością (r) i gęstością (d) a odległościami od Saturna lub stopniem ich aktywności geologicznej.

Mimas: r ~196 km, d = 1,17 g/cm³, orbita 186 tys km. Powierzchnia stara, silnie zryta kraterami. Duże kratery (> 30 km) mają górkę centralne. Największy krater Herschel – ok. 130 km ma głębokość 10 km, i górkę centralną 6 km. W rejonie bieguna S są tylko mniejsze kratery – rzędu 20 km (jakiś rodzaj resurfacingu?).

Tektonika. Rowy długości do 90 km, szerokości 10 km i głębokości 1 – 2 km. Tektoniczne? Wynik impaktu? (Herschel). Endogeniczne? (ryfty?).

Enceladus: r ~250 km, d = 1,24 g/cm³, doba = rok = 1,370 doby Ziemi, orbita 238 000 km.

Powierzchnia ma najwyższe albedo w Układzie Słonecznym (> 0,9), to czysty lód wodny. Duże albedo = zimno – średnio -200°C. Mało kraterów, czyli powierzchnia młodsza niż Mimas (choć dalej od Saturna). Kratery płytkie. Aktywny geologicznie - może nawet teraz? Widoczne ciepłe pasy na powierzchni („tiger strips”), z nich erupcje wody (śniegu?). Źródło ciepła = siły pływowe Saturna, Tethys i Dione (z nią w rezonansie 1:2), ale emituje 5x więcej energii, niż ten mechanizm może dostarczać. Jednocześnie za mały na wewnętrzne (radiogeniczne) źródła ciepła.

Budowa wewnętrzna: lodowa litosfera, pod nią chyba strefy stopione (skoro ciepłe pasy na powierzchni). Skalne jądro?

Tektonika: w okolicach bieguna S ciepłe pasy, będące strefami tworzenia nowej skorupy lodowej (odpowiednik ziemskich grzbietów oceanicznych), w rzeźbie widoczne jako doliny. Naokoło tego obszaru pasmo górskie otaczające całą powiększającą się S płytę (wynik kompresji). Dalej ku N dwa pasy terenów intensywnie spękanych (głównie N-S), ciągnące się przez środki półkul przedniej i tylnej. Reszta obszaru mniej zaangażowana – wyraźnie starsza powierzchnia (kratery).

Tethys: r ~530 km, d = 1,21 g/cm³, doba = rok = 1,888 doby Ziemi, orbita 295 000 km.

Powierzchnia silnie zryta kraterami, 1 wielki: Odysseus – 400 km, silniej zryta tylna półkula – kratery do 200 km. Też na tylnej półkuli – jasne smugi na ciemnym tle. Szron? Wybuchowe wydzielanie gazu?

Tektonika: ryft Ithaca Chasma – obejmuje 3/4 globu - rozgałęziony system kanionów długości ponad 1000 (2000?) km, szerokość 65 (100?) km, głębokość 3 – 5 km. Geneza:

1 - reakcja na impakt Odysseus'a (fala sejsmiczna)?,

2 - zamarznięcie wnętrza, ekspansja i rozsadzenie globu?

Na mapie geologicznej z Atlasu Układu Słonecznego NASA „urwiska uskokowe”.

Dione: $r = 560$ km, $d = 1,43$ g/cm³, doba = rok = 2,737 doby Ziemi, orbita 377 000 km.

Powierzchnia lodowa, podobna do Tethys. Tylne półkule ciemniejsza, przednia jednolicie jasna, na niej dużo kraterów. Na tylnej jasne smugi na ciemnym tle (wulkanizm lodowy? szron?), mało kraterów, te które są – są przykryte młodszymi smugami.

Budowa wewnętrzna: jądro skalne = 1/3 masy, reszta – lód wodny.

Tektonika: ryfty - na mapie geologicznej z Atlasu Układu Słonecznego NASA - “krainy kanionów”.

Rhea: $r = 765$ km, $d = 1,33$ g/cm³, doba = rok = 4,518 doby Ziemi, orbita 527 000 km.

Powierzchnia: podobna do Dione: przednia półkula silniej zryta kraterami, jasna, krater > 40 km, płaskie, tylna półkula – jasne smugi na ciemnym tle, kraterów nieliczne, < 40 km. Basen impaktowy 235 km, dwupięścienny. Budowa wewnętrzna: głównie lód, skał < 1/3.

Tektonika - brak?

Tytan: $r = 2575$ km (większy niż Merkury!) $d = 1,88$ g/cm³, doba = rok = 15,95 doby Ziemi, orbita 1 222 000 km. Atmosfera grubości > 300 km, głównie N₂, + metan, argon. Śladowo co najmniej 12 różnych węglowodorów i woda. Na powierzchni ciśnienie 1,5 – 1,6 ziemskiego. Z zewnątrz pomarańczowy, na powierzchni ciemno. Atmosfera przypomina smog. Prawdopodobnie padają deszcze z ciekłego etanu, tworząc jeziora węglowodorów.

Budowa wewnętrzna: jądro skalne o promieniu ok. 1700 km (?), płaszcz lodowy – zapewne warstwowany. Brak pola magnetycznego.

Tektonika? Na obrazach radarowych z Cassiniego na razie słabo czytelna (brak np. wyraźnych ryftów). Góry niejasnej genezy.

Iapetus: $r =$ ok. 730 km, $d = 1,21$ g/cm³, doba = rok = 79,33 doby Ziemi, orbita 3 561 000 km.

Powierzchnia: 2 bardzo różne półkule – granica między nimi bardzo ostra: przednia prawie czarna, tylna jasna. Ciemna przednia półkula (Cassini Regio) – trudno na niej cokolwiek zobaczyć. Na tylnej półkuli i w rejonie bieguna S kraterów do 120 km średnicy. Ciemna substancja na przedniej półkuli tworzy chyba cienką warstwę, ale brak na niej jasnych pokryw wyrzutowych przy młodych kraterach (może jest od nich młodsza?).

Tektonika – Cassini (2005) odkrył wielki, stromy grzbiet (do 11- 13 km wysokości!) nieznanego genezy, przebiegający dokładnie wzdłuż równika, wokół prawie całego globu.

Układ Urana.

21 księżyców, 5 największych odkryto teleskopowo 1787 - 1948, resztę – głównie Voyager 2 1985 - 1986. Wszystkie synchroniczne (mają 4 różne półkule).

Miranda: $r = 236$ km, $d = 1,15$ g/cm³, doba = rok = 1,4 doby Ziemi, orbita 130 000 km.

Powierzchnia lodowa, albedo 0,27. Temperatura powierzchni –187°C. Powierzchnia bardzo nierówna – występują doliny, skarpy, grzbiety, krater. Typy powierzchni:

1 - stare „faliste równiny” pokryte kraterami,

2 - młodsze fragmenty (Coronae), złożone z równoległych skarp i grzbietów, skomplikowane geologicznie (sfałdowane?), występujące na 3 obszarach (to zupełnie inne struktury niż Coronae wenusjańskie!). Tworzą wzory rowów i grzbietów, podobne do Ganimedesa (J) i Enceladusa (S).

Tektonika. Są fałdy, czyli była kompresja? Uskoki ekstensyjne, tworzą czasem skarpy do 5 km wysokości. Kaniony to rowy tektoniczne? ryfty? Niektóre mają do 10 - 15 (20?) km głębokości i setki km długości. Zaskakująco duże jak na tak mały księżyc. Wynik rozbicia i ponownej akrecji?

Ariel: $r = 579$ km, $d = 1,56$ g/cm³, doba = rok = 2,52 doby Ziemi, orbita 192 000 km.

Najjaśniejszy księżyc Urana – albedo 0,34. Powierzchnia - 2 rodzaje, stosunkowo złożone:

1 – zryta kraterami, ale brak bardzo dużych (bardzo starych) kraterów (jakiś wczesny resurfacing?),

2 – gładkie równiny (wulkanizm lodowy?) Na nich: - rowy tektoniczne, w nich kręte doliny – dna

jakby wygładzone przepływem. Co płynęło w temperaturze -180°C ? Amoniak? Ciekły metan?

Tektonika: system rowów tektonicznych – „doliny ryftowe podobne do Marsa”. Na mapie geologicznej z Atlasu Układu Słonecznego NASA – uskoki.

Umbriel: $r = 585$ km, $d = 1,52$ g/cm³, doba = rok = 4,14 doby Ziemi, orbita 266 000 km.

Najciemniejszy księżyc Urana – albedo 0,18. Poza tym podobny do Ariela, ale powierzchnia jednolita, pokryta kraterami, wyraźnie starsza niż Ariela.

Tektonika – na mapie geologicznej z Atlasu Układu Słonecznego NASA uskoki, rowy tektoniczne i grzbiety (geneza niejasna).

Tytania: $r = 789$ km (największa w układzie Urana), $d = 1,70$ g/cm³, doba = rok = 8,706 doby Ziemi, obraca się wokół osi „poziomej” (!), orbita 438 000 km.

Powierzchnia: albedo 0,27. Rodzaje:

1 – pokryta kraterami, głównie małymi (choć jest kilka dużych basenów wielopięściennych),

2 – gładkie obszary („wulkanizm lodowej papki”?).

Tektonika: doliny uskokowe długości do 1500 km, szerokości 75 km. Sporo uskoków – był co najmniej 1 epizod uskokowania. Globalne rozszerzanie się? (ekspansja lodu w zamarzającym wnętrzu?).

Oberon: $r = 761$ km, $d = 1,64$ g/cm³, doba = rok = 13,5 doby Ziemi, orbita 583 400 km.

Powierzchnia: albedo 0,24 - lodowa, stara, silnie zryta kraterami. Kratery duże – 50 - 100 km.

Część ma jasne pokrywy wyrzutowe. Nie widać przejawów aktywności wewnętrznej. Ale jest jakaś góra wysokości 6 km (niejasna geneza).

Tektonika: niektóre liniowe i zakrzywione urwiska mogą być uskokami. Na mapie geologicznej z Atlasu Układu Słonecznego NASA „urwiska uskokowe” i „głęboka dolina lub rów tektoniczny”.

Układ Neptuna.

13 księżyców – 2 odkryte teleskopowo (1846, 1949), resztę odkrył Voyager 2 (1989) i nowe teleskopy naziemne (5). Największy: Tryton, pozostałe dużo mniejsze (największy z nich – Proteus, ma $r = 209$ km).

Tryton: $r = 1350$ km, $d = 2,07$ g/cm³, doba = rok = 5,88 doby Ziemi, orbita 355 000 km, synchroniczna, ale wsteczna (jedyne duże księżycy w Układzie Słonecznym o wstecznej orbicie).

Orbita niestabilna – Tryton zbliża się do Neptuna. Oś obrotu nachylona 21° , więc są pory roku - stwierdzona S czapa lodowa (lód azotowy) od bieguna S prawie do równika (w czasie przelotu Voyagera 2 lato było na N półkuli). Bardzo zimny (-235°C .) Bardzo rzadka atmosfera N₂.

Budowa wewnętrzna: 1/3 lód, 2/3 skały.

Powierzchnia: lód i szron metanowy i azotowy. Dość młoda – brak dużych kraterów impaktowych (kratery w ogóle bardzo rzadkie). Są jakieś zagłębienia pooddzielane grzbiętami, ale to nie impakty, bo zbyt regularne (nic podobnego nie ma w Układzie Słonecznym). Są 2 rodzaje terenów:

1 – starszy, bardzo nierówny - „kantalurowy” (kantalurowy = rodzaj melona), pocięty liniowymi rowami i dolinami. Niektóre doliny częściowo wypełnione podłużnymi centralnymi grzbiętami (wynik wytryśnięcia lodu przez systemy pęknięć?),

2 – młode równiny (wulkaniczne? = wulkanizm lodowy).

Voyager 2 wykrył erupcje typu gejzerów z N₂ i pyłu na wysokość do 8 km - ciemne pionowe smugi, powyżej rozwiewane przez wiatry na setki km.

Tektonika: widoczne ryfty? w każdym razie są ekstensyjne struktury spękania. Na mapie geologicznej z Atlasu Układu Słonecznego NASA „urwisko lub uskok”, „rów tektoniczny”,

„grzbiet”, „utwory liniowe” – bardzo długie!

Historia: wsteczna, niestabilna orbita - może powstał gdzie indziej, a potem przechwycony grawitacyjnie przez Neptuna? Jeśli tak, to w pewnym momencie działały na niego wielkie siły pływowe, w których wyniku mógł zostać przynajmniej częściowo stopiony.

PLUTON i CHARON – TNO (trans-Neptunian Object), planeta karłowata.

Pluton – planeta karłowata, $r = \sim 1190$ km, $d = 1,87$ g/cm³ (lodowy księżyc).

Charon - $r = \sim 600$ km, $d = 1,72$ g/cm³ (lodowy księżyc).

Sonda NEW Horizons 14.07.2015 przeleciała w odległości 12 500 km od Plutona, a 2 h 15 min później w odległości 27 000 km od Charona.

Już pierwsze odebrane zdjęcia wskazują na nadspodziewanie duży udział **procesów tektonicznych**.

Na **Plutonie** – grzbiety górskie (Tartarus Dorsa), zróżnicowane wiekowo fragmenty powierzchni (resurfacing?), lodowe wulkany i prawdopodobnie rowy tektoniczne.

Na **Charonie** – co najmniej 5 wielkich rowów tektonicznych, podobnych do występujących na innych lodowych księżycach.

TNOs - trans-Neptunian Objects, **KBOs** – obiekty Pasa Kuipera, w odległości 30 do > 100 AU.

I odkryty Pluton, obecnie znane ok. 1200, z tego 6 o promieniach > 500 km (planety karłowate).

Największe to: Pluton, Eris, Makemake, Haumea, Quaoar, Sedna, Orcus, Salacia, Varda i Varuna.

PLANETY POZASŁONECZNE

2 najczęściej stosowane metody wykrywania:

Metoda prędkości radialnych, wykorzystująca efekt Dopplera – wykrywa „kołysanie się” gwiazdy spowodowane oddziaływaniem grawitacyjnym okrążającej ją planety – umożliwia określenie masy planety,

Tranzyt – cykliczne zmniejszenia jasności gwiazdy, gdy przed jej tarczą przechodzi planeta – pozwala określić średnicę planety.

Masa i średnica planety (pozwalająca określić jej **objętość**) umożliwiają obliczenie jej **średniej gęstości**, która dostarcza najogólniejszych informacji o możliwym **składzie** planety i – przynajmniej teoretycznie – pozwala zaliczyć ją do którejś ze znanych nam grup (lub stworzyć nową grupę planet...).