

TEKTONIKA PLANET – wykład dla WG UW

dr Wojciech Ozimkowski

Wykład 1: Tektonika i planety - definicje. Źródła danych

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 (wglębnych). 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 (zewnętrzny) można uznać za tektoniczne?

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 (2006):

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

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

Definicje „geologiczne” = ważniejsza jest kwestia wielkości i budowy wewnętrznej, orbita nieistotna.

Wniosek: przyjmując definicje „geologiczne” za „planety” możemy uznać też duże księżyce = 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 teoretycznie jest związana z rozmiarami planet, a występowanie zwartej skorupy z ich gęstościami, stąd:

“**Porządkowanie Układu Słonecznego**” według rozmiarów i gęstości.

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 ($> 1 \text{ g/cm}^3$) może być to sztywna skorupa lodowa.

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

- **skalne** (glinokrzemianowe) 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 księżyce**) – 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 (bo mała szybkość stygnięcia i większa produkcja ciepła radiogenicznego), większa grawitacja (tektonika grawitacyjna itp.).

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”.

Jaroszewski 1980 („Tektonika uskoków i fałdów”): “tektonika zajmuje się przyczynami, przebiegiem i wynikami procesów diastroficznych”.

Diastrofizm (Jaroszewski et al., „Słownik geologii dynamicznej” 1985): 1. “ogół procesów prowadzących do mechanicznych odkształceń skorupy ziemskiej; termin stosowany w zasadzie dla procesów działających na dużych obszarach. 2. jak 1., ale z zastrzeżeniem, że chodzi tylko o te procesy, które mają bezpośrednie źródło w czynnikach endogenicznych”.

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 (wglębnych). W praktyce ograniczenie to jest jednak trudne do zastosowania.”

Jaroszewski et al. 1985 – Tektonika: ”dział geologii zajmujący się budową tektoniczną, przyczynami i mechanizmem jej powstania (...) oraz historią jej rozwoju. (...) tektonika obejmuje nie tylko endogeniczne odkształcenia skorupy ziemskiej i całej litosfery, lecz także znacznie szersze odkształcenia egzogeniczne (...) - np. glacitektonika, tektonika grawitacyjna - procesy zachodzące głównie pod wpływem siły ciężkości.”

Czyli szersze – nie ograniczone wyłącznie do procesów endogenicznych - znaczenie terminu „tektonika” jest dopuszczane.

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 kratery 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 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 uznaje się, że struktury tektoniczne mogą powstawać zarówno na skutek działania czynników endo-, jak i egzogenicznych

METODY BADAŃ. Czy możliwe (technicznie) jest 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:

także obserwacje teleskopowe – naziemne i orbitalne (HST) – choć ciągle za małą rozdzielczość.

Inne metody naziemne: np. badania spektroskopowe, radarowe – bardziej przydatne (głównie spektroskopowe badania składu powierzchni planet/księżyców).

Sondy kosmiczne - klasyfikacja: 1 - przelot, 2 - orbiter, 3 - lądownik (stacjonarny lub ruchomy = „łazik”) – wpływ rodzaju sondy na dokładność rozpoznania.

Sondy = **teledetekcja**, pasywna i aktywna, wykorzystująca różne długości (pasma) promieniowania elektromagnetycznego.

Np. geomorfologia = przy braku gęstej atmosfery zwykle światło widzialne i/lub bliska IR, przy gęstych atmosferach (chmury) mikrofałe = radar (Wenus, Tytan).

Światło widzialne i bliska IR:

petrologia, mineralogia = absorpcja wielu charakterystycznych pasm, głównie w IR.

Często wybór pasma wynika z ograniczeń technicznych – np. matryce CCD zwykle 400-1100 nm.

Techniki fotograficzne – głównie dawne misje załogowe (Apollo).

Techniki telewizyjne (Vidicon) – Mariner 4, 1965.

Cechy fotografii i TV – kartometryczność, rejestrowane pasma 400–600 nm.

Matryce CCD, CMOS – od ok. 20 lat, teraz najpopularniejsze. Półprzewodnikowe matryce podzielone na piksele lub skanery. Zalety: w pełni liniowe charakterystyki zależności ilości fotonów i prądu, pasmo od 200 do 1110 nm, zapis cyfrowy. Wady – problemy z geometrią obrazów skaningowych (ruch obrotowy planety względem skanera).

Metody mikrofałowe:

- aktywne (= radar) – liczne możliwości: pomiar opóźnienia wiązki odbitej + efektu Dopplera = rzeźba + chropowatość + właściwości dielektryczne powierzchni (→ rzeźba + litologia), zmienne kąty nachylenia wiązki, długości fal i płaszczyzny polaryzacji → “wielospektralność”.
- pasywne (głównie czujniki IR termalnej) – źródła wewnętrzne + odbite promieniowanie Słońca = trudności w interpretacji. Zależności od temperatury, własności emisyjnych, ekspozycji stoku itp.

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

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

Dane **geofizyczne**.

Sejsmika – tylko Księżyc (Mars – nieudane próby).

Grawimetria. Ogólne dane o masach i gęstościach planet (→ budowa wewnętrzna planety).

Dane o różnicowaniach regionalnych – orbiter jako grawimetr (wykorzystany efekt Dopplera).

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

Dane z **lądowników** (Księżyc, Wenus, Mars, Tytan) – praktycznie punktowe (mały zasięg łazików).

Dane z **misji załogowych** (Księżyc) – pełny zestaw danych, ograniczona powierzchnia badań.

TEKTONIKA PLANET - 2 WG UW

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.

Zróznicowanie budowy wewnętrznej planet:

- 1 - Zróznicowanie na podstawowe **3 grupy planet** (wykres r/d) – planety typu ziemskiego (Terrestrial Planets), lodowe księżyce (Icy Satellites), gazowe olbrzymy (Jovian Planets).
- 2 - Zróznicowanie 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** (górny i dolny), **jądro** (zewnątrzne i wewnętrzne), lub fizycznie: **litosfera, astenosfera**, mezosfera, barysfera.

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

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

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

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

Źródła ciepła powodującego upłynnienie planety:

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

Źródła

- 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 ($\sim r^3$) i powierzchni ($\sim r^2$), oraz od wielkości strumienia cieplnego. Czy w ogóle wystygnie? (np. Jowisz).

Mechanizmy stygnięcia, według rosnącej efektywności (szczegółowo → w. 3):

1 - promieniowanie cieplne, 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 - wyznaczano geometrycznie: odległość + średnica kątowna (teleskopowo), obecnie – na podstawie pomiaru czasu zaniku sygnału radiowego sondy przelatującej za planetą.

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

Średnia **gęstość** = masa : objętość.

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

W uproszczeniu:

- przyjmuje się założenia ogólne składu jądra i płaszcza (→ średnie gęstości geosfer),
- znajduje takie wzajemne proporcje promieni geosfer, aby wymodelowany glob miał średnią gęstość wyznaczoną dla całej planety.

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

Testowanie przyjętego modelu polega zwykle na badaniu odkształceń planety: na podstawie

przyjętego składu, oraz grubości płaszczka (czasem też 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 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 = 11,21 x Ziemi
objętość	= 1200 x Ziemi
masa	= 318 x Ziemi
gęstość	= 1,33 g/cm ³ = 0,24 gęstości Ziemi
średnia odległość od Słońca	= 5,20 AU
rok	= 4432 dni
dość	= 9 h 55 min
księżycy	67 4 duże

Saturn:

promień	= 60 268 km = 9,45 x Ziemi
objętość	= 844 x Ziemi
masa	= 95 x Ziemi
gęstość	= 0,69 g/cm ³ = 0,125 gęstości Ziemi
średnia odległość od Słońca	= 9,54 AU
rok	= 29,458 lat
dość	= 10 h 14 min
księżycy	62 5 dużych

Uran:

promień	= 25 500 km = 4 x Ziemi
objętość	= 64 x Ziemi
masa	= 14,5 x Ziemi
gęstość	= 1,29 g/cm ³ = 0,23 gęstości Ziemi
średnia odległość od Słońca	= 19,19 AU
rok	= 84 lata
dość	= 17 h 54 min
księżycy	27 5 dużych

Neptun:

promień	= 24 746 km	= 3,88 x Ziemi
objętość		= ~ 60 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	1 duży

Dalej:

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 WG UW

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, mapy seryjne (arkuszowe).

Treść map geologicznych – wydzielenia:

- „geomorfologiczno – geologiczne”, tu m.in. → tektonika,
- „litologiczne” = petrograficzne, zawartości jakiegoś określonego minerału itp.,
- „stratygraficzne” = wieku względnego.

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, różnice w występowaniu na różnych planetach (kwestia atmosfer, erozji i akumulacji, “resurfacingu”).

„**Geometria**” krateru impaktowego:

okrągły (prawie bez względu na kąt padania impaktora),
lekko wyniesiony (podgięty) brzeg,

naokoło pokrywy wyrzutowe (ejecta, e. blanket).

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

Krater 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 proste przechodzą w złożone, zależy od grawitacji danej planety: na Ziemi to przejście przy średnicy 2 - 4 km (zależnie od skał podłoża), na Księżycu – przy 15 - 20 km (im mniejsza grawitacja, tym większe krater pojedyncze = nieprzetworzone).

Dno krateru = metamorfizm uderzeniowy (charakterystyczne minerały), skały podłoża pokruszone (brekcje impaktowe). Na tym pokrywa stopionych skał (impact melt).

Reszta materiału wyrzucona na zewnątrz → pokrywy wyrzutowe (ejecta blanket).

Czasem wokół powstają krater wtórne.

Potem: przetwarzanie zboczy - osuwiska, erozja → powiększanie średnicy, wypiętrzanie dna → spłykanie.

Na Ziemi erozja → szybkie usunięcie zboczy i pokryw wyrzutowych. Zostają tylko płaskie „ring structures”, odzwierciedlające zróżnicowaną odporność skał zmetamorfizowanych uderzeniowo.

Metamorfizm uderzeniowy = skrajnie wysokie ciśnienia, niemożliwe do uzyskania na Ziemi w innych procesach geologicznych → struktury „shatter cones”, „planar features” w ziarnach kwarcu i skaleni, wysokociśnieniowe fazy minerałów - np. stiszowit (odmiana kwarcu).

Rola ciśnienia: przy impakcie 15-25 km/s ciśnienie do 5 000 kbar – a już powyżej 700 kbar topnienie skał. Topi się jednak tylko ok. 10% masy skał, reszta ulega wyrzuceniu.

Rozkład w czasie bombardowania meteorytowego (okres Heavy Bombardment, potem - słabnące).

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”.

Mechanizm impaktu (podstawowe etapy):

- kolizja = przekazanie energii kinetycznej → powstanie fali uderzeniowej, wyrzucenie okruchów → stopienie (odparowanie) skał (lodu),
- rozchodzenie się kompresyjnej fali uderzeniowej i dekompresja skał za nią → wczesne pokrywy wyrzutowe;
- wyrzut materiału na skutek dekompresji → powstanie krateru, = główny etap powstawania pokryw wyrzutowych,
- późniejsze przemodelowywanie ścian krateru (grawitacyjne i erozyjne), wypiętrzanie dna (odprężeniowe, izostacyjne).

Wulkanizm - czas trwania aktywności wulkanicznej zależy od źródeł ciepła, szybkości (mechanizmu) stygnięcia, oraz od wielkości planety.

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

Mechanizmy stygnięcia:

- 1 - radiacja = promieniowanie cieplne (IR) = wypromieniowywanie ciepła, nawet w próżni, ale stygnie tylko bardzo cienka warstwa powierzchniowa. Mało skuteczne - bardziej efektywne:
- 2 - przewodnictwo cieplne = przepływ ciepła przez materię. Żeby efektywnie stygły głębsze części planet konieczne jest jednak przenoszenie ciepła razem z materią, czyli:

- 3 - erupcje (wylewy) = wulkanizm = odprowadzanie ciepła z górnej części płaszcza/skorupy, ale do tego konieczne jest przynajmniej lokalne upłynnienie materii. Jeszcze skuteczniejsza:
- 4 - konwekcja – przenoszenie ciepła razem z materią (ciepła 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 , = małe obiekty stygną dużo szybciej niż duże.

Zróznicowanie własności law (chemicznych, fizycznych) = różne typy wulkanów, rola temperatury: chłodniej = większa lepkość (gdy stały skład), rola grawitacji: wpływ na rozmiary wulkanów (mniejsza = wyższe), zwykle interakcja wszystkich tych czynników.

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

Wietrzenie – czynniki:

- meteoryty - oprócz kraterów tworzą regolit,
- grawitacja → osuwiska,
- wiatr (gdy jest atmosfera) → wydmy itp. formy eoliczne (skąd „piasek?”),
- woda – lub inne podobne substancje → erozja (Mars, Tytan?)

TEKTONIKA PLANET - 4 WG UW

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

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

- **Powierzchniowe:**
 - Soil Mechanics Investigation – badania mechaniki gruntu – ręczne sondy do 0,7 m o średnicach 2 i 4 cm, Apollo 15-17 – elektryczne sondy 2 cm – 1,5 – 3 m.
 - Passive Seismic Experiment – instalacja geofonów - rozpoznanie budowy wewnętrznej, ogólny model budowy (geosfery),
 - Active Seismic Experiment - budowa górnych 100 m,

- Lunar Surface Magnetometer (Apollo 12, 15, 16) – badanie pola magnetycznego Słońca, Ziemi i Księżyca,
- Lunar Portable Magnetometer (Apollo 14, 16) – badanie lokalnych pól magnetycznych,
- Traverse Gravimeter Experiment (Apollo 17) – szacunek miąższości bazaltów morza,
- Heat Flow Experiment (Apollo 15, 17) - badanie strumienia ciepłego na głębokości 1,6 – 2,3 m.
- **Orbitalne:**
 - Metric & Panoramic Cameras – Apollo 15 – 17 ze 110 km: Metric Camera = 165 x 165 km, rozdzielczość 20 m, Panoramic Camera – pasy 20 km, rozdzielczość 2 m, zdjęcia stereoskopowe – różnice wysokości 10 m,
 - Laser Altimeter (Apollo 15 – 17) – pomiary punktowe co 30 km z dokładnością wysokości 10 m,
 - S-Band Transponder Experiment = regionalne zmiany pola grawitacyjnego → rozkład mas (grawimetria),
 - Bistatic Radar Experiment (Apollo 14 – 16) badania szorstkości i własności dielektrycznych skał,
 - Apollo Lunar Sounder Experiment = radar, pasma 2 – 60 cm = penetracja skorupy do 2 km,
 - Alpha Particle Spectrometer (Apollo 15, 16) – zawartość radonu 222 i polonu 210 = wskaźników rozpadu uranu 238 → wykryto wzrost ich zawartości nad pewnymi regionami = głębokie uskoki?
 - X-ray Fluorescence Spectrometer (Apollo 15, 16) wykrywanie na powierzchni Księżyca Mg, Al, Si,
 - Gamma-Ray Spectrometer (Apollo 15, 16) – badanie promieniotwórczości naturalnej.

Clementine - 1994; misja kartograficzna, wielospektralna: 11 pasm od UV (415 nm) do średniej IR (2800 nm) = 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 („Top 10...”):

- 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 – mało wyraźne;

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

Ostatnio (2016) dopuszcza się istnienie stopionego zewnętrznego jądra, przy promieniu całego jądra ok. 480 km.

Astenosfera - częściowo stopiona, występuje poniżej 1000 km (przy $r = 1737$ km!!)

- magnetyka → „melting point” na 800 – 1500 km,

Litosfera - jednorodna do ok. 1000 km.

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

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

Skorupa (ogólnie)

- gruba – 60 – 70 km = 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 jego 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? Bo bazalty mórz są cienkie i występują tylko na powierzchni.

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 nagle (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 WG UW

Wykład 5: Powierzchnia Księżyca

Kartografia – mapy topograficzne i geologiczne Księżyca.

Zasoby internetowe: Google Earth, http://webgis.wr.usgs.gov/pigwad/down/moon_geology.htm

Warunki fizyczne na powierzchni:

brak atmosfery, („outgasing events”?),

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

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

Topografia – nazewnictwo, statystyka form geomorfologicznych (świadczy o intensywności poszczególnych procesów kształtujących powierzchnię):

kratery	Crater (impaktowy)	> 1500	
	Catena (łańcuch kraterów)	20	
„morza”	Oceanus	1	
	Mare	22	
	Lacus (jezioro”)	20	
	Palus („bagno”)	3	
	Sinus („zatoka”)	11	
„lądy”(prócz kraterów):			
równiny	Planitia	1	
góry	Dorsum (grzbiet)	40	(tektoniczny?)
	Mons (góra)	60	
	Promontorium (przylądek)	8	
doliny	Fossa (długa, wąska, płytka depresja)	2	(tektoniczna?)
	Rima (szczelina, kanion)	125	(tektoniczna?)
	Valis (dolina)	11	(tektoniczna?)
	Rupes (skarpa)	9	(tektoniczna?)

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 i 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 (lądowania Apollo na „morzach”, tu – tylko Łuny = pobranie < 1 kg próbek).

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

- brekcje impaktowe – zlepione szklivem z impaktów – prawie wszystkie mają 3,85-4,0 mld. lat,
- brekcje KREEP (K = potas, Rare Earth Elements, P = fosfor), zlepione resztkami nieskrystalizowanej magmy.

Główny proces modelujący powierzchnię „ziem” 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 wielopierścieniowe,
- > 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% drugiej; 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 (0,5-1,5 km?) = stanowią tylko 1% masy skorupy, bogate w oliwin i piroksen.
W magmach były gazy (CO₂, CO, ale chyba nie para H₂O) = były 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 bazaltów (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 (22?) + 1 ocean, głównie po „tej” stronie, po drugiej tylko 3 (z tego 2 na brzegach).

Regolit (Lunar Soil, Sediment) - warstwa na morzach średnio 5 m, na lądach 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.

Apollo 11:

- 5% regolitu pochodzi z odległości > 100 km, 0,5% - > 1000 km,
- brak w nim szczątków meteorytów = są sproszkowane (wzbogacenia składu: Au, Ni, Ir),
- zachowuje różnicowania składu = inny na lądach (bogaty w Al), inny na morzach (Fe, Mg),
- jest okresowo wywracany – do głębokości 1 cm raz na 1 mln lat, do 1m – co 1 mld lat,
- „pożytki” z regolitu (zawiera różne rodzaje skał) i jego „wady” (zaciera podłoże), podobne do ziemskich osadów czwartorzędowych.
- umożliwia badanie historii emisji Słońca (wiatr słoneczny) – izotopy He, Ne, C, N są „implantowane” w regolit.

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

- 1 – kopernikowska = krater i pokrywy wyrzutowe najmłodsze, z jasnymi promieniami (Copernicus, Tycho),
- 2 – eratostenesowska = krater starsze i ich pokrywy wyrzutowe – bez jasnych promieni,
- 3 – procellaryjska (Ocean Burz) = większość ciemnych obszarów mórz (wylewy bazaltów),
- 4 – imbryjska – pokrywy wyrzutowe po impakcie tworzącym basen Morza Deszczów,
- 5 – przedimbryjska = najstarsza.

Potem inni geolodzy wprowadzili modyfikacje:

- połączyli warstwę (lawę) procellaryjską z imbryjską w 1 „Imbrian Period”,
- podzielili warstwę przedimbryjską na: 1 - młodsze „osady nektaryjskie”, 2 - starsze „osady przednektaryjskie”.

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 hipotezy:

- 1 – przechwycenie „gotowego” – mało prawdopodobne (orbita też),
- 2 – oderwanie się na skutek wirowania Ziemi – ale to by wymagało obrotu Ziemi co 2,5 godz., potem wykluczyła to analiza momentu obrotowego układu Ziemia – Księżyc,
- 3 – uformowanie jednoczesne jako układu podwójnego – ale za duża dysproporcja wielkości geosfer,
- 4 – teoria wielkiego impaktu – obecnie przyjmowana: Hartmann i 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 mórz, 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 mórz - jednocześnie z wylewami bazaltów miały miejsce erupcje piroklastyczne. Okres eratostenesowski = mniejsze kratery i powstanie reszty mórz (koniec tworzenia mórz – ok. 2,5 mld. lat), po zaniku „wulkanizmu mórz” jedynym czynnikiem kształtującym powierzchnię pozostało bombardowanie meteorytowe. Okres kopernikowski < 1,1 mld lat – kratery z promieniami (małe, < 100 km), potem tylko regolit. Współczesna aktywność: sejsmometry Apollo w latach 1970 - 77 zarejestrowały 1700 impaktów o masach 0,5-5 000 kg, a także trzęsienia Księżyca powodowane przez siły pływowe – o sile do 5⁰ Richtera, hipocentra na 600 - 900 (800 - 1000) km.

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 (obecnie negowane – struktury uważane za nałożenie się pokryw wyrzutowych, które obiegiły cały glob?).

Obciążenie bazaltami mórz powodowało ugięcie środków basenów, oraz zapewne uaktywnianie starych uskoków w podłożu. Obciążenie bazaltami → ugięcie → naprężenia tensyjne (rozciągające) w częściach zewnętrznych mórz = serie koncentrycznych spękań i rowów tektonicznych (**Fossae**). 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 - nad pogrzebanymi przez lawy 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 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.

Wypłaszczenie i pęknięcie dna kraterów obserwowane już przy ich średnicach < 20 km. Hipotezy:

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

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

TEKTONIKA PLANET - 6 WG UW

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, nachylona 7° , w perihelium Merkury ma największa szybkość z planet: 47 km/s.

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

Jest blisko Słońca (obserwowany z Ziemi oddala się od niego do 28°) = widoczny tylko rano i wieczorem = do 2 godz. przed wschodem i po zachodzie → trudne obserwacje teleskopowe z Ziemi: 1 - za jasno, 2 - gruba warstwa atmosfery (pod skosem, 10 x grubsza niż w zenicie). Stąd były trudności nawet w określeniu czasu obrotu: uważano, że jest związany siłami pływowymi ze Słońcem (jak Księżyc z Ziemią, czyli doba = rok). Dopplerowskie naziemne obserwacje radarowe (1965) wykazały, że rok = 89,97 dnia Z., doba = 58,65 dnia Z, czyli 1,5 doby na rok = 3 doby na 2 lata = rezonans 3:2. Skutkiem szybkiego ruchu orbitalnego i wolnego obrotowego jest „cofanie się” Słońca na niebie w perihelium. Występują ogromne różnice nasłonecznienia poszczególnych długości geograficznych, stąd największa w Układzie Słonecznym dobowa różnica temperatur = 600°C (-170°C do $+430^\circ\text{C}$).

Badania:

Do 2007 r. znany jedynie z misji **Marinera 10** (3 przeloty w latach 1974-75). Łącznie ~ 10 000 obrazów o rozdzielczości 100 m - 4 km = pokrycie 57% (45%?) planety. Wyglądał jak Księżyc – stąd brak zainteresowania przez ponad 20 lat. Potem – naziemne badania radarowe (Goldstone, Arecibo) i próby badań teleskopowych. Od 03.2011 do 04.2015 badany przez orbiter kartograficzny **MESSENGER** (MErcury Surface, Space ENviroment, GEOchemistry & Ranging).

Budowa wewnętrzna:

Masa = 5,5% Ziemi. Bardzo duża **gęstość** – **5,43** (Ziemia – 5,52). Obecna gęstość = wynik grawitacyjnej kompresji – po „dekompresji” Ziemia miałaby gęstość 4,4, a Merkury 5,3. To anomalna gęstość w porównaniu z innymi planetami (wykres r/d). Ma 1,43 średnicy Księżycy (→ objętość 2,74 x większa), a masę 4,5 x większą.

Jądro anomalnie duże, metaliczne (Fe? Fe+Ni?) = 70% masy, 42% objętości, 78% promienia, czyli $r = 1800 - 1900 \text{ km}$ („wielkości Księżycy” = 1737 km), być może wewnątrz stałe, a zewnętrzna warstwa (150 km?) płynna (jeśli jest domieszka siarki, to topnienie już w 1300 K).

Termika, magnetyka → przy tych rozmiarach powinien dawno wystygnać – a tymczasem jest pole magnetyczne nachylone 70° do osi = 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.

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.

Powierzchnia:

zagadkowy przy tak ogromnym jądrze **deficyt Fe na powierzchni** – początkowo nie wykryto go wcale, teraz < 3%?, 6%? = i tak najmniej wśród planet typu ziemskiego.

Dość duże zróżnicowanie regionalne i genetyczne = alkaliczne **sjenity nefelinowe? labradoryty? anortozyty?**, plagioklasy (anortyt) i pirokseny ≈ do **brekcji księżycowych?**, również **bazalty i dioryty** ($\text{SiO}_2 = 49 - 55\%$).

Być może na biegunach, w kraterach, gdzie temp. = -163°C są ślady wody = **lodu** (naziemne badania radarowe 1991 Caltech + JPL). Pochodzenie: stary lód? ciągle odgazowywanie planety? komety lodowe? Obecność lodu na biegunach pośrednio potwierdzałaby stabilność osi obrotu planety.

Nomenklatura i statystyka **form geomorfologicznych** (2015, po misji MESSENGER):

kratery		393	
„albedo feature”		32	
Planitia	równina	7	
Dorsum	grzbiet	2	
Mons	góra	1	
Rupes	skarpa, urwisko	30	- uważane za przejawy uskoku
Vallis	kręta dolina	5	

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, więc trudny do wykrycia bez badań składu skał (brak spektroskopii).

Typy terenów – 4 rodzaje:

- **heavily cratered terrain** – podobne do łądów Księżyca, na nich duże, stare kratery impaktowe m.in.: Basen Caloris – średnica 1300 km, wielopierścieniowy (grzbiety do 2 – 3 km), częściowo wypełniony lawą. Datowany (zliczanie kraterów) na ok. 3,6 mld lat (= wiek podobny do mórz księżycowych). Fale uderzeniowe obiegły cały glob i zogniskowały się na antypodach, tworząc „obszar chaotyczny” (spękania, uskoki, rowy – tektonika blokowa) = tzw. epizod Caloris.
- **intercrater plains** – 1/3 powierzchni = łagodne, faliste równiny (rolling plains), dużo małych kraterów o średnicach do 15 km,
- **smooth plains** – podobne do mórz księżycowych, ale jaśniejsze = dawne wulkanity? (są 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). Mniej kraterów, za to są na nich kręte grzbiety.
- **hilly and lineated terrain** = antypody basenu Caloris (tektonika blokowa po impakcie Caloris?).

Historia geologiczna Merkurego:

- formowanie ok. 4,5 mld lat temu – dyferencjacja na jądro i płaszcz (całkowita ?), 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 – okres przedtołstojowski = okres wczesnej, kompletnej dyferencjacji, powstanie skorupy,
- 2 – okres tołstojowski – początek = basen impaktowy o średnicy 500 km na półkuli S,
- 3 – okres kaloryjski – oprócz basenu Caloris i „antypodów” – gładkie dna wielu innych basenów (wylewy lawy?),
- 4 – okres mansuryjski (impakt...),
- 5 – okres kuiperowski (impakt...).

Tektonika.

Zachowane są formy starsze od Caloris (nie tną go): „liniowe twory”, przeważnie N-S, NW-SE i NE-SW = tzw. „**siatka merkurijska**”. 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, co spowodowało dopasowanie układu naprężeń. Takie zwolnienie obrotów to = podgrzanie planety o ok. 100°C. Nowsze opracowania – po misji MESSENGER – nie wspominają o siatce merkurijskiej.

Są też młodsze **uskoki** przecinające całą powierzchnię Merkurego – szereg zakrzywionych urwisk i skarp („Rupes”) – związane z późniejszym stygnięciem i kurczeniem 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 1828? 1852?), dla Ziemi dawno zarzuconej. Ale Merkury to 1 płyta („silicate outer shell”) = może to właściwy model dla takich planet?

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

Tektonika ekstensyjna - jedynie:

- rowy w basenie Caloris (znane z Marinera 10), oraz
- w jego centrum radialne rowy tektoniczne **Pantheon Fossae**,
- uskoki normalne w wyniesieniu centralnym krateru Raditladi.

Młodsze zjawiska tektoniczne? (Thomas 1997):

- wulkaniczno-tektoniczna subsydencja → kaldery,
- otwarte szczeliny tektoniczne,
- spękania tworzące rowy i zręby tektoniczne na wypiętrzonej rejonie krateru Tołstoja.

Czyli – mogą być jakieś siły endogeniczne (= źródła ciepła) działające stosunkowo długo.

TEKTONIKA PLANET - 7 WG UW

Wykład 7: Wenus (1)

Orbita 0,723 AU = 108 mln km, prawie kołowa (0,7%), 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).

Stopień rozpoznania.

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:

- 1970 – Venera 7 – I lądowanie na innej planecie – 23 min. transmisji danych: $t = 475^{\circ}\text{C}$ i $p = 90$ bar,
- 1975 – Venera 9 i 10 – lądowniki – I obrazy powierzchni, analizy skał – 53 i 65 min. transmisji,
- 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 (spektrometria X),
- 1983 – Venera 15 i 16 – radarowa mapa o rozdzielczości 1-2 km, termika powierzchni,
- 1984 – Vega 1, 2 – lądowniki z balonami,
- 1989 – 94 – **Magellan**: orbiter radarowy: teoretyczna rozdzielczość 150 x 150m. Radar = 1 antena pracująca na przemian: 1 - badanie powierzchni (skośne), 2 - pomiary wysokości – pionowo (altymetria radarowa) o dokładności 30 m, 3 - radiometr o dokładności 2 K.

Zadania:

- radarowe obrazy powierzchni z rozdzielczością „1 km per line pair”,
- mapa topograficzna z rozdzielczością poziomą 50 km, pionową 100 m,
- mapa grawimetryczna z rozdzielczością 700 km i dokładnością 1 – 2 mgal.,
- „rozwińcie 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. ⁴⁰Ar i ³⁶Ar.

Dużo mniej ⁴⁰Ar (produktu rozpadu U) niż na Ziemi = inny transport materii z płaszczą na powierzchnię?

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 razy 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) – Magellan (1994) wykrył co najmniej 2 obszary deficytu masy = zapewne wstępujących prądów konwekcyjnych (upwellingu), są też stwierdzane „nieaktywne pióropusze płaszcz”.

Płaszcz o miąższości do 2950 km, cięższe krzemiany, z większą zawartością metali.

Jądro o r = 2940 km, Fe-Ni, zapewne jest płynne jądro zewnętrzne. Ale mimo to brak pola magnetycznego = nie stwierdzono go (może być, jeśli jest ok. 10 000 x słabsze od ziemskiego). To rezultat prawie całkowitego braku rotacji = brak efektu dynama? Być może w jądrze jest 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

Formy geomorfologiczne (ich ilość):

Kontynenty

Terra	3	= duży obszar lądowy,
Regio	20	= duży obszar wyróżniający się zdolnością odbijania mikrofal lub różny od obszarów sąsiednich
Planum	2	= duże wyżyny,

Niziny, równiny

baseny:

Planitia	40	= nizina,
Fluctus	40	= „flow terrain” = obszar ze śladami płynięcia (lawy?),

Góry:

Mons	120	= góra,
Dorsum	100	= grzbiet,
Tholus	33	= kopulaste wzgórze,
Colles	12	= małe wzgórza lub pagórki,
Farrum	8	= wulkany typu racuchów („pancakes”) lub ich szereg,
Undae	3	= wydmy,

Doliny

Vallis	61	= dolina,
Chasma	55	= głęboka, wydłużona depresja o stromych zboczach,
Fossa	32	= wąska, długa, płytka depresja,

Rupes 7 = skarpa,

Inne:

Crater ok. 750 = kratery impaktowe,

Corona 285 = owalna, jajowata forma tektoniczna (?),

Patera 75 = nieregularny krater (zwykle owalny, wulkaniczny),

Tessera ok. 70 = teren „dachówkowaty” (mozaika?),

Linea 16 = lineament.

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 = Lada Terra i czwarty, 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 WG UW

Wykład 8: Wenus (2)

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 kratery impaktowe rozrzucone losowo, czyli cała powierzchnia jest młoda i równolegowa (~800 mln lat ?). Modyfikacja kraterów przez późniejsze procesy jest niewielka, bo kratery są młode i brak jest wietrzenia (w 62% nie zmodyfikowane, 6% zalanych lawą, 12% przemodelowanych tektonicznie).

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 jednoznacznych dowodów współczesnej aktywności.

Równiny wulkaniczne (Volcanic Plains) zajmują 85% powierzchni, występują na wysokościach od -1,5 km do + 2 km. Mają setki km szerokości i długości. Na radarze większość ciemna (czyli mają gładką powierzchnię), choć niektóre są jasne (chropowate?).

Strumienie lawy (Lava Flows) długości od kilku km do setek km, zaczynają się od wulkanów, spękań, lub depresji, choć czasem nie widać źródła. Mają gładką powierzchnię. Występują na nich kanały (channels), wały (levees), grzbiety (pressure ridges), granice poszczególnych wypływów (flow margins), ślady płynięcia (flow directions), a także małe wulkany - tarcze i stożki.

Kanały lawowe (Lava Channels) długości setek do tysiący km, zwykle są nierozgałęzione. Dzielią się na:

- „Sinuous Rilles” (kręte rowki, rzeczki) – wypływają z określonego źródła, zwężające się i spływające w dół. Mają głębokie, pojedyncze koryto, 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). Siarka? Lawy węglanowe?

Wulkany - podział wg. wielkości i morfologii:

- **Małe** = < 20 km
 - małe wulkany tarczowe o średnicach ok. 10 km, zwykle płaskie, ciemniejsze (radarowo) od otoczenia, często ze stożkiem centralnym o średnicy <1 km,
 - małe wulkany stożkowe – stromsze (zbocza 12 - 23°), wysokość 200–1700 m. Występują grupowo, zwykle na równinach, nie widać na nich indywidualnych strumieni lawy. Często związane ze spękaniem i uskokami,
 - małe kopuły.
- **Średnie** = 20–100 km:
 - wulkany „płatkowe” - (anemone (Petal) volcanoes) - rozpoznano 25, związane z erupcjami szczelinowymi,
 - wulkany typu „kleszcza” (tick volcanoes), rozpoznano ok. 50, mają promieniście ułożone grzbiety i dolinki,
 - kopuły (domes) –średnice średnio 24 km, wysokości 70 - 2000 m (średnio ok. 700 m). Zwykle okrągłe, mają stosunkowo strome brzegi i płaski wierzchołek. Skutek jednostajnego wypływu lepkiej lawy z centralnej żyły? Występują pojedynczo, parami i grupami, często są związane z koronami. Najwięcej jest ich koło lub tuż poniżej „wysokości zerowej” = średniego promienia planety.
 - Racuchy (pancake) – płaskie, o średnicy ~25 km, wysokość 750 m. Stwierdzono ok. 150 szt. Wynik erupcji lepkiej lawy na płaskiej powierzchni?
- **Wielkie**: 100 – 600 km:
 - tarczowe, o wysokości 3 – 5 km nad otaczający teren, mają widoczne promieniste wypływy lawy. Łącznie 156 szt. Występują na wzniesieniach wulkanicznych (volcanic rises) i na przecięciach struktur tektonicznych,
 - kaldery (Paterae) – owalne depresje, wyglądające jak kraterzy impaktowe bez obrzeża – 86 szt.

TEKTONIKA Venus.

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

- **Wulkaniczne wzniesienia** (Volcanic Rises) - kopulaste, tektonika ekstensyjna, wulkanizm i anomalie grawimetryczne świadczą, że mogą być rozwinięte nad głęboko zakorzenionymi prądami konwekcyjnymi w płaszczu.
- **Płaskowyzę** (Plateau highlands), nieco niższe od V.R., starsze od nich, zwykle pokryte

obszarami CTR (tesserae). Geneza:

- zbieżne zstępujące prądy konwekcyjne („coldspot” = downwelling) → grubienie skorupy, nad nimi „crustal plateaus”,
- intruzje i ekstruzje (mantle plume-related event) → nadtapianie i cienienie skorupy, potem stygnięcie i zapadanie.
- **Niziny** (Lowland plains) - odpowiednik basenów oceanicznych? Ogromne wylewy law. Czasem uważane za miejsca pograżania płaszcza. Na nich mało wulkanów, kompresyjne grzbiety (= skrócenie?), spore ujemne anomalie grawimetryczne.

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

Korony (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 płaszcza. Aktywność wulkaniczna sięga do 4 długości promienia korony od środka. Rozwój – zapewne 4 etapy:

- 1 - ekstensja podłoża nad pióropuszem płaszcza = 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 intensywna 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?

Inne **spękania i uskoki** – np. wokół wielkich wulkanów występują radialne i koncentryczne rowy tektoniczne = wynik ugięcia litosfery lub opróżniania komór lawowych na głębokości 20 – 40 km. Wielka ilość dajek.

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 – elewacje 10 km przy bazaltowej skorupie wymagają grubości skorupy ponad 100 km – tak gruba skorupa powinna przechodzić fazowo w eklogit, a to izostatycznie zmniejszyłoby różnice wysokości do 2 km. Może jest opóźnienie termiczne takiego przejścia – jeżeli nawet rzędu 100 mln lat, to góry mają tylko < 25 mln lat.

Grzbiety zmarszczkowe (Wrinkle ridges) o genezie kompresyjnej. W poszczególnych wystąpieniach mają dość regularne odstępy (spacing) – np. ok. $13 \text{ km} \pm 6 \text{ km}$, a grzbiety mają średnią szerokość $1,25 \pm 0,66 \text{ km}$. Ale brak korelacji tych parametrów pomiędzy poszczególnymi wystąpieniami. Generalnie te grzbiety są 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?

Brak płyt litosfery = **brak tektoniki płyt**. Cała litosfera była ściskana lub rozciągana jednocześnie, czyli występowały globalnie spójne epizody deformacji, odległe o krótkie przedziały czasowe - podwyższenie temperatury litosfery o 100 K powoduje wzrost naprężeń w litosferze o 1000 barów, wielkość porównywalną z naciskami górotwórczymi.

Prądy konwekcyjne zapewne nie osiągają powierzchni (konwekcja typu „sluggish-lid”, na Ziemi - „mobile lid”) – zamiast pasm konwekcji występują jedynie plamy gorąca – stwierdzono 2 – 3 aktywne hot-spots (Atla Regio, Western Eistla, Beta Regio). Być może są też słabo czytelne początkowe przejawy subdukcji (Artemis Corona?).

Historia Wenus - zapewne powstała > 4 mld lat temu, przeszła przez okres akrecji i Heavy Bombardment, ulegając dyferencjacji na geosfery. Brak informacji o następnych > 3 mld lat. Prawdopodobnie potem - grubienie litosfery i zanik ruchu płyt (nie wiadomi, co było przyczyną a co skutkiem). Brak recyكلingu CO₂ spowodował galopujący efekt cieplarniany, aż do odparowania H₂O. Brak H₂O w magmach, stąd ich mała 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 płaszcza 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 3 - 4 etapy deformacji pokryw lawowych:
 - a – **Sigrun** Group – rowy tektoniczne („closely spaced graben systems”) = ekstensja,
 - b – **Lavinia** Group – liczne grzbiety = przejście z ekstensji do kompresji,
 - c – **Rusalka** Group – teraz najbardziej rozwinięta – liczne grzbiety „wrinkle ridges”

= kompresja, ten okres (a - c), sądząc po ilości impaktów, musiał być stosunkowo krótki – chyba < 100 mln lat, potem:

- 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 WG UW

Wykład 9: Mars (1)

Orbita 228mln km = 1,524 AU (1,36 – 1,64 AU = ekscentryczność 9,3%). Rok = 687 dni = 1,88 roku ziemskiego (Z). Doła = 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 go 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 Księżyca). Grawitacja 0,38 g.

Obserwacje teleskopowe. Najlepsza rozdzielczość dawniej ok. 100 km = widoczne tylko główne jednostki (jasne – ciemne). Najlepsza osiągnięta rozdzielczość HST = tylko 22 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 piroksen (= skały wulkaniczne).

Misje badawcze.

1960 – 64 – 5 nieudanych misji SU, 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 (SU) – lądowiki. M-2 rozbił się, Mars 3 – 2.10.71 – I lądowanie – 20 s video.

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: od całego widnokregu („rybie oko” - rozdzielczość 7,5 km, kolor), przez kolorowe średniej rozdzielczości (ok. 230 m) do czarno-białych 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, potem DEM.

TES - Thermal Emission Spectrometer – IR, rozdzielczość 9 km² – 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 (głównie kosmicznego),

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

Trwają misje orbiterów obrazujących: **MO**, **ESA Mars Express** (od 2003), **NASA Mars Reconnaissance Orbiter** (MRO, od 2006), oraz 2 innych (MAVEN, ExoMars).

Kartografia

Marinery → mapy 1:25 mln cieniowany relief i topograficzna, 1:5 mln cieniowany relief, 30 ark. = The Mars Chart (MC).

Viking 1,2 → 1:25 mln, 1:15 mln relief i cieniowany relief + albedo. 140 kontrolowanych fotomozajek 1:2 mln = cały Mars, > 126 kontrolowanych fotomozajek 1:500 000 interesujących obszarów (Mars Transverse Mercator = MTM). Na podstawie danych z orbiterów Vikingów Mosaicked Digital Image Model (MDIM) i współgrający z nim Digital Terrain Model (DTM). Z danych HRSC Mars Express (ESA) sporządzane są poziomicowe mapy w skalach 1:200 000, 1:100 000 i 1:50 000 i (podobno) DEM o wysokiej rozdzielczości.

Kartografia geologiczna.

Geologiczne mapy na podstawie The Mars Chart 1:5 mln (Marinery) = 30 arkuszy.

Także część map 1:2 mln (fotomozajek z Vikingów) jest w wersji geologicznej.

Podstawowa mapa geologiczna Marsa - 1:500 000 (NASA/USGS).

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:(Mg+Fe)) promień ma 1450 – 1700 km (42-50%) dla modeli „ciepłych”, lub 1300 – 1450 km (38-42%) dla modeli „zimnych”. Czyli jądro stosunkowo niewielkie (Ziemia 54%).

Jądro chyba **stale** – brak efektu dynamy, bo pola magnetyczne tylko szczątkowe (brak globalnego). Wykonana w 2011 dokładna mapa grawimetryczna Marsa i analiza odkształceń jego powierzchni na skutek wpływów przemawiają jednak za istnieniem **zewnętrznego stopionego jądra** (2016).

Pole magnetyczne: MGS stwierdził pasma namagnesowane w przeciwnych kierunkach, podobnie jak na Ziemi w stosunkowo młodej skorupie oceanicznej. To 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” pomiędzy spękaniem musiała się namagnesować odwrotnie (jak w pociętym magnesie sztabkowym).

Możliwe częściowe stopienie od 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.

Płaszcz. Podobny do płaszcz Ziemi, ale bogatszy w FeO, a uboższy w MgO i CaO:

Płaszcz stosunkowo gruby (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 płaszcz Marsa w warunkach wysokich temperatur i ciśnień (Bertka i Fei, 1997) wynika, że budowa płaszcz 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 izostatycznie (prócz najmłodszych części: prowincji wulkanicznych Tharsis i Elysium, impaktowego basenu Isidis oraz regionu Tempe Terra).
Skąły bazaltowo-andezytowe.

Powierzchnia Marsa – nazewnictwo form - bardzo dużo nazw, stosunkowo niewiele rodzajów form.

Kontynenty i baseny: Terra, Planum, Vastitas, Planitia.

Impaktowe: kratery - 653, catena (łańcuchy kraterów) - 15.

Góry – na ogół wulkaniczne, łącznie 54: Montes - 18, Colles - 11, Tholus - 11, Patera - 14, Mensa (płaskowyż).

Doliny – łącznie 177: Fossa - 50, Vallis – 107 (rzeczne?), Chasma – 20 (tektoniczne), Cavus (nieregularne depresje o stromych brzegach).

Grzbiety (Dorsum) – 20, skarpy (Rupes) - 21, Scopulus (nieregularna skarpa), Sulcus (równoległe grzbiety i bruzdy) – 9, Undae (wydmy) – 2, Labes (osuwisko).

Formy wyłącznie marsjańskie: Chaos – 17 (poprzechylane bloki), Labirynthus - 3 (przecinające się doliny).

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 zmarłej.

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 lądów 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 spękaniem (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.

Czasem inny podział terenów Marsa:

Cratered Highlands, Volcanic Plains, Tharsis Bulge, oraz: **Chaotic Terrain** i **Equatorial Canyons**.

Chaotic Terrain = „labirynty”.

Equatorial Canyons - ogromny system dolin ryftowych (?) Valles Marineris (wykł. 10).

TEKTONIKA PLANET - 10 WG UW

Wykład 10: Mars (2)

Mars - czynniki kształtujące powierzchnię, tektonika, historia.

Woda. 2 rodzaje działalności wody (dawnej):

- 1 – normalna, powolna działalność wód płynących (erozja) – 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 (kilkaset km?), praktycznie bez dopływów, prostoliniowe. Często zaczynają się na obszarach chaotycznych („Chaotic Terrains”) utworzonych przez poprzecyłane bloki nad obszarami, z których zapewne gwałtownie uwolniła się woda. Niektóre zaczynają się na spękaniach lub rowach tektonicznych. 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 itp. i „baseny”, to może i „ocean” na N nizinach? Poszukiwano śladów linii brzegowej (Vikingi), 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 woda?) 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.

Gdzie teraz może być woda:

- 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 szacowana jest na $3,2 - 4,2 \text{ mln km}^3 = 1,5 \times$ 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 (CO_2 , H_2O), po przegrzaniu - gwałtowne uwalnianie się gazów: CO_2 ulatnia się do atmosfery, H_2O tworzy okresowy ocean. CO_2 w atmosferze powoduje efekt cieplarniany, funkcjonuje normalny obieg wody, ale krótko: deszcze wypłukują CO_2 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 NS już w I orbicie wykrył bardzo silny sygnał H na powierzchni (= do głębokości 1 m), czyli jest woda, głównie w rejonach biegunów.

Impakty. Baseny impaktowe – Hellas = średnica 2 100 km, głębokość 9 km, otoczony wałem o wysokości do 2 km, sięgającym do do 4 000 km od środka. Basen Argyre - mniejszy.

Kratery - 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 wielopięścieniowe.

Pokrywy wyrzutowe – często jakby z błota („splosh ejecta”, „fluidized ejecta”) – 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 – 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

Dość słaba, przeważają struktury **ekstensyjne**.

Klasyczna koncepcja „**All Tharsis**”, zakłada, że cała tektonika Marsa związana jest jedynie z wypiętrzaniem prowincji wulkanicznej Tharsis nad wielkim, pojedynczym pióropuszem płaszcza – wokół **Tharsis Bulge** rozwinął się szeroki system **promienistych uskoków 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 rozwinięte na założeniach uskokowych (ryft?) – następnie przemodelowane przez osuwiska i erozję rzeczną. Rozciągają się na E od wypiętrzenia Tharsis Bulge na długości 4 000 km. Ekstensja wynosi do 5-6%, czyli od 5-10 km na końcach W i E do 20-30 km na środku. Ale: (D.Mége, P.Masson 1996) przy takiej ekstensji za małe są widoczne zrzuty uskoków – brak 9 – 26 km. Na pewno geneza dolin uskokowa (ekstensja), przemodelowane przez osuwiska i erozję wodną.

Teorie genezy:

- pasywny ryfting w skorupie osłabionej przez plamę gorącą,
- ekstensja spowodowana obciążeniem Tharsis lawami.

Etapy rozwoju Valles Marineris:

- 1 – powstanie kilku zapadlisk (depresji) – widoczne w ścianach osady warstwowe (jeziorne?),
- 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 (deep thrusting),
- fałdowe, wyginanie ze ściskania (buckling of lava plains),
- nad płytkimi odkłuciami (thrust rooted on shallow decollement levels).

Skrócenie skorupy szacowane na ich podstawie jest mniejsze niż na Merkurym, a większe niż na Księżycu. Badania morfologii i radar naziemny nie potwierdzają związku grzbietów z głębokimi uskokami. Raczej są ograniczone do sztywnego materiału równin (do wiecznej zmarzliny? - wtedy niejasny mechanizm skrócenia = kompresji).

Wokół nabrzmiń (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 – kompresyjne pasmo górskie. Geneza trudna do wyjaśnienia bez tektoniki płyt. Kompresja na granicy wypiętrzonego obszaru Tharsis, w dolnej części litosfery, nałożona na aktywność plamy gorąca? Najstarsze fragmenty silnie sfałdowane – może jednak na początku historii Marsa działał jakiś rodzaj tektoniki płyt? (koncepcja orogenezy hesperyjsko-noachyjskiej – Anguita et al., 2006).

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 na małych głębokościach – 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
- 5 - wulkanizm,
- 6 - rozwój Valles Marineris,
- 7 – powstanie „Ridged plains” i dolin rzecznych.

Późna:

- 8 -wulkanizm Tharsis i Elysium,
- 9 - katastrofalne powodzie (kanały, osady),
- 10 - wygasanie aktywności Tharsis,
- 11 - wulkanizm,
- 12 - wietrzenie.

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

1. **Noachian** = „okres noachyjski” – koniec zestalania się skorupy i okres intensywnego bombardowania – tereny silnie zryte kraterami i stare baseny impaktowe (Hellas).. Tworzenie się północnych nizin, erozja wodna i wietrzna. Erupcje wulkaniczne (powierzchniowe) o dużym zasięgu (globalnym?).
2. **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.

3. **Amazonian** = „okres amazoński” – najmłodszy. Późniejsze wylewy law Tharsis i Elysium (ciąg dalszy tworzenia wulkanów – m.in. Olympus). Osady (wodne, eoliczne) wypełniają część basenów uderzeniowych (Hellas, Argyre, Isidis) i pokrywają fragmenty północnych nizin.

TEKTONIKA PLANET - 11 WG UW

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 **płat** 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, ale także nieco dolin mogących być rowami tektonicznymi.

Układ JOWISZA: 67 księżyców, z tego 4 duże (3 większe od Księżyca, 1 nawet od Merkurego). Te 4 – „Galileuszowskie” (1610) to: Io i Europa - typu ziemskiego, Ganimedes i Callisto - lodowe.

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).

IO

„Najbardziej niezwykły księżyc w Układzie Słonecznym”. Większy od Księżyca: $r = 1815$ km, masa 1,5% Ziemi, gęstość 3,55, orbita 422 tys. km, kołowa (0,4%), „rok” = „doba” = 1,769 doby ziemskiej. Stale zwrócony tą samą stroną do Jowisza = ma 2 różne półkule: przednią (leading) i tylną (trailing). Krąży w polu magnetycznym Jowisza, tworząc „generator” prądu (400 000 V i 3 mln. A w poprzek globu), a magnetosfera Jowisza zdziera około 1 000 kg/s materii z jego powierzchni, tworząc torus wzdłuż orbity (jony Na, S, O). Ma atmosferę H_2S , też ulatniającą się w Kosmos, ale chyba powstającą cały czas na nowo.

Powierzchnia: średnia temperatura – $143^\circ C$, ale są „hot spots” (jeziora lawy?). Bardzo kolorowa – żółta, czerwona – to allotropowe odmiany siarki i jej związki. Bieguny ciemniejsze, okolice równika jasne, przednia półkula jaśniejsza niż tylna. Brak śladów kraterów impaktowych = powierzchnia bardzo młoda (10 mln lat?). Widoczny „resurfacing” – zmiany powierzchni rejestrowane w skali miesięcy.

Intensywny wulkanizm: czynne kilkanaście dużych wulkanów, o bardzo zmiennej aktywności, oraz > 300 otworów wulkanicznych (aktywnych i nie). Rozkład wulkanizmu przypadkowy, czyli chyba brak płyt i innych struktur tektonicznych I rzędu. Widoczne są pióropusze wulkaniczne (piroklastyczne?) do 300 km wysokości, o szybkości do 1 km/s, wyrzucające do 1 000 t/s.

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. Może siarka tylko po wierzchu (piroklastyczna)?

Ciepło napędzające wulkanizm jest wynikiem tarcia pływowego – „tidal pumping”: rezonans orbitalny między Jowiszem a Europą i Ganymedem powoduje sztywne pływy litosfery – na IO jest to cyklicznie przemieszczające się nabrzmienie o wysokości ok. 100 m.

Wnętrze: płaszcz krzemianowy, stopiony, 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: jak na tak aktywny obiekt, to tylko nieliczne struktury niewątpliwie tektoniczne. Może niektóre skarpy to **uskoki**? Ale ich układ jest dość przypadkowy, choć na obrazach o lepszej rozdzielczości niektóre brzegi pater i gór pasują do siebie (= ekstensja?). 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, masa 0,8% Ziemi, gęstość $3,01$ g/cm³, orbita 671 tys. km, kołowa, „rok” = „doba” = 3,55 doby ziemskiej.

Powierzchnia: młoda – prawie brak kraterów impaktowych (28), tylko kilka dużych – 2 typy:

1 – o średnicy kilkudziesięciu km, mają stożki centralne, podniesione brzegi, pokrywy wyrzutowe,

2 – płaskie kołowe obszary o średnicach > 100 km („Macula”).

Bardzo płaska powierzchnia – różnice wysokości do kilku km. Powierzchnia to lód H₂O. Okolice biegunów jaśniejsze, tylnia półkula stosunkowo ciemna.

Równiny poprzecinane różnokolorowymi wstęgami (zanieczyszczenia krzemianami? siarką z Io? materią meteorytową?). Kilkaście rodzajów powierzchni terenu, 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 z centralnym stożkiem, 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 3000 km długości – proste i cykloidalne. 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, do 18 km szerokości i 1 000 km długości, czasem łączą się w „brązowe pasy”,
- „szare pasma” występujące koło bieguna S – stare, bo poprzecinane przez wszystkie inne struktury.

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 skrzywiony o ok. 30° – to wynik ruchu (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 g/cm³, orbita 1070 tys. km, kołowa, „rok” = „doba” = 7,154 doby ziemskiej.

Powierzchnia: bardzo jasna – najciemniejsze obszary jaśniejsze od lądów księżycowych. Są kratery impaktowe, czyli starsza niż Io i Europy. Kratery – od granicy rozdzielczości (< 1 km) do setek km – ale niewiele ma > 60 km. Większe są płytsze. Kratery 5 – 35 km mają górki centralne. Większe mają często „centralne dołki” lub depresje (wytopiskowe?). Są też „utwory krateropodobne” 50 – 400 km, płaskie, bez centralnych depresji – tzw. „palimpsests” („phantom craters”). Kratery mają pokrywy wyrzutowe jasne lub ciemne, zależnie od rodzaju obszaru, na którym występują, czyli tereny te są do znacznej głębokości jednorodne.

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. Na nich mało kraterów, czyli młodsze („resurfacing” wulkaniczny? tektoniczny?). 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 trwała ok. 0,5 mln lat, 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”.

CALLISTO

Duży księżyc: $r = 2\,400$ km, masa 1,8% Ziemi, gęstość $1,83\text{ g/cm}^3$, orbita 1 883 tys. km, kołowa, „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? Małe kratery są rzadkie, cała powierzchnia pokryta jest ciemnym materiałem, dość jednorodna.

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 – środek 230 km średnicy, pierścienie do 800 km. Inne mniejsze, ale podobne.

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 WG UW

Wykład 12: Daleki Układ Słoneczny - księżyce Saturna, Urana, 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. Czasem

półkule znacznie się różnią. Wszystkie prócz 2 (Iapetus i Phoebe) krążą po kołowych orbitach w płaszczyźnie pierścieni. Nie ma żadnej zależności między ich wielkością (r) i gęstością (d) a odległościami od Saturna lub stopniem ich aktywności geologicznej.

MIMAS: $r \sim 196$ km, $d = 1,17$ g/cm³, orbita 186 tys km. Powierzchnia stara, silnie zryta kraterami. Duże kratery (> 30 km) mają górki centralne. Największy krater Herschel – ok. 130 km (1/3 średnicy Mimas) 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: $r \sim 250$ 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, stąd 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?) ze stref topnienia wewnątrz. To może być woda z amoniakiem (obniżenie krzepnięcia o $> 100^{\circ}\text{C}$). Źródło ciepła = siły pływowe Saturna, Tethys i Dione (z nią w rezonansie 1:2), ale emituje 5x więcej energii, niż ten mechanizm może dostarczać. Za mały na wewnętrzne (radiogeniczne) źródła ciepła?

Rodzaje terenów: 1 - gładkie równiny, bez kraterów, 2 - pola kraterów (< 35 km).

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 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: $r \sim 530$ 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 (40% średnicy), 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 - zamrożenie 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. Tylna półkula 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. Są tereny silnie zryte kraterami (średnice do 100 km) i gładkie równiny – podział na 3 rodzaje: intensywnie, średnio i lekko „zbombardowane”. Na równinach kratery mniejsze (< 30 km), głównie na przedniej półkuli.

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

Tektonika: ryfty - na mapie geologicznej 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, kratery > 40 km, płaskie, tylna półkula – jasne smugi na ciemnym tle, kratery nieliczne, < 40 km. Basen impaktowy 235 km, dwupierścieniowy. Budowa wewnętrzna: głównie lód, skał $< 1/3$.

Tektonika - brak?

TYTAN: $r = 2575$ km! (większy niż Merkury) $d = 1,88$ g/cm³, doba = rok = 15,945 doby Ziemi,

orbita 1 222 000 km. Atmosfera grubości > 300 km, głównie N₂, metan (10%? 6%?), 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 = 79,330 doby Ziemi, orbita 3 561 000 km. Powierzchnia: 2 bardzo różne półkule – granica między nimi bardzo ostra: przednia prawie czarna (albedo 0,03 – 0,05 = jak węgiel), tylna jasna (albedo 0,5 = jak brudny śnieg). Ciemna przednia półkula (Cassini Regio) – trudno na niej cokolwiek zobaczyć. Na tylnej półkuli i w rejonie bieguna S występują kratery do 120 km średnicy. Duże mają góry centralne i dobrze określone brzegi. Ciemna substancja na przedniej półkuli tworzy chyba cienką warstwę, ale brak na niej jasnych pokryw wyrzutowych przy młodych kraterach (może jest jeszcze młodsza?) To wulkanizm metanowy? Węglista substancja pochodzenia meteorytowego?

Tektonika – Cassini (2005) odkrył wielki, stromy grzbiet (do 11 – 13 km wysokości) nieznaney 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). Lodowe, ale dość ciemne jak na lód – niejasny mechanizm pociemniania (może: to lód metanowy, z którego są wybijane przez fotony atomy H, przez co zostaje C?). Gęstości na ogół 1,5 - 1,7 g/cm³ (tylko Miranda 1,15 g/cm³). Powierzchnie przeobrażone: impakty – najsilniejsze na zewnętrznych, procesy endogeniczne – głównie na wewnętrznych. Wewnątrz orbit dużych 5 księżyców – mniejsze 10 (r = 13 – 77 km).

MIRANDA: r = 236 km, d = 1,15 g/cm³, doba = rok = 1,414 doby Ziemi, orbita 130 000 km. Powierzchnia lodowa, albedo 0,27. Temperatura powierzchni –187°C. Powierzchnia bardzo nierówna – występują doliny, skarpy, grzbiety, kratery. 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: Corona Inverness, Corona Arden i Corona Elsinore (to zupełnie inne struktury niż corony wenusjańskie!). Te tworzą wzory rowów i grzbietów, podobne do Ganimedesa (J) i Enkeladosa (S). Wśród nich łąty gładkiej materii o równomiernym albedo (nowa powierzchnia = skutek erupcji lodowej papki? wpływ potoków typu lodowca?).

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? Ciekły CO?

Tektonika: system rowów tektonicznych – „doliny ryftowe podobne do Marsa”. Na mapie geologicznej NASA - uskoki.

UMBRIEL: r = 585 km, d = 1,52 g/cm³, doba = rok = 4,144 doby Ziemi, orbita 266 000 km. Najciemniejszy księżyc Urana – albedo 0,18. Poza tym podobny do Ariela, ale powierzchnia

jednolita, pokryta kraterami, wyraźnie „przyciemniona” – starsza niż Ariela. Pokrywy wyrzutowe prawie niewidoczne – może też są ciemne? (to może znaczyć, że pokrywa ciemnego materiału jest gruba - lub może tylko niedawno została przyciemniona na powierzchni).

Tektonika – na mapie geologicznej 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 wielopięściowych),
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 = 13,463 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 (jakiś ciemny materiał pokrywający dna kraterów?). Ale jest też jakaś góra wysokości 6 km (niejasna geneza).

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

Układ NEPTUNA.

14 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). To 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 (1/70 000 bar).

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 grzbiętami (wynik wytryśnięcia lodu przez systemy pęknięć?),

2 – młode równiny (wulkaniczne?). 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 spękania struktury ekstensyjne. Na mapie geologicznej NASA „urwisko lub uskok”, „rów tektoniczny”, „grzbiet”, „utwory liniowe” – bardzo długie!

Historia: nietypowo duża gęstość i wsteczna, niestabilna orbita - czyli 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 i pozostał taki przynajmniej przez 1 mld lat po przechwyceniu.

PLUTON i CHARON

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 (2006 – 2022?) 14.07.2015 przeleciała w odległości 12 500 km od Plutona, a 2 h 15 min później w odległości 27 000 km od Charona. Przesyłanie wszystkich zarejestrowanych obrazów potrwa ok. roku, ale już pierwsze odebrane zdjęcia wskazują na nadspodziewanie duży udział **procesów tektonicznych**.

Na **Plutonie** – grzbiety górskie (m.in. Tartarus Dorsa), zróżnicowane wiekowo fragmenty powierzchni (resurfacing?), lodowe wulkany, 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 – teoretycznie – pozwala zaliczyć ją do którejś ze znanych nam grup (lub stworzyć nową grupę planet...).