

UNIVERZITA KARLOVA
Přírodovědecká fakulta
Katedra fyzické geografie a geoekologie

Studijní program: Geografie
Studijní obor: Fyzická geografie a geoinformatika



Alexandra Dergunova

PŘÍRODNÍ PROSTŘEDÍ PLANETY VENUŠE

THE NATURAL ENVIRONMENT OF PLANET VENUS

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: prof. RNDr. Jan Kalvoda, DrSc.

Praha, 2019

Zadání bakalářské práce

Název práce: Přírodní prostředí planety Venuše

Cíle práce:

V práci je popsán současný stav poznatků o přírodním prostředí planety Venuše, zjištěný studiem a hodnocením dostupných údajů v odborných publikacích. Cílem bakalářské práce je charakteristika planety Venuše jako celku, její atmosféry, povrchu a vnitřní stavby. Zvláštní pozornost je věnována morfografii povrchu Venuše se záměrem charakterizovat hlavní morfostrukturní tvary a typy reliéfových procesů, kterými vznikaly.

Použité pracovní metody, zájmové území a zdroje:

Studium a hodnocení odborné literatury o planetě Venuši bylo prováděno s ohledem na hlavní výsledky několika etap kosmických výzkumů této planety, jejichž sled je popsán v příloze 1. Pracovní postupy při přípravě předložené studie spočívaly 1) v systematické rešerši dostupných odborných publikací a specializovaných elektronických zdrojů, na niž navázaly 2) analytické studie a uspořádání vybraných údajů o jednotlivých přírodních sférách planety Venuše. Další pracovní metodou, která mohla být v průběhu přípravy této specifické studie o přírodním prostředí jedné z terestrických planet využita, byla tematicky zaměřená prohlídka a výběr (zveřejněných) snímků z dálkového průzkumu Venuše. V planetologických výzkumech je princip tohoto přístupu založen na porovnávání, případně i na hlubší korelaci dokumentace o sledované planetě se známými přírodními procesy, jevy a povrchovými tvary na Zemi. Uvedené postupy směřovaly k možnosti vytvoření základního třídění povrchových tvarů Venuše podle jejich morfostrukturního původu.

Datum zadání: 17. 12. 2018

Jméno studenta: Alexandra Dergunova

Podpis studenta:

Jméno vedoucího práce: prof. RNDr. Jan Kalvoda, DrSc.

Podpis vedoucího práce:

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne

.....

Alexandra Dergunova

Poděkování:

Tímto bych chtěla poděkovat vedoucímu své bakalářské práce prof. RNDr. Janu Kalvodovi, DrSc. za odborné vedení, cenné rady a trpělivost při zpracování této práce. Dále bych ráda poděkovala své rodině, především mámě, která mě podporovala po celou dobu studia. Na závěr bych ráda poděkovala svému partnerovi za neustálou podporu během zpracování této práce.

Abstrakt

V práci je popsán současný stav poznatků o přírodním prostředí planety Venuše, zjištěný studiem a hodnocením dostupných údajů v odborných publikacích. Cílem bakalářské práce je charakteristika této planety jako celku, její atmosféry, povrchu a vnitřní stavby. Zvláštní pozornost je věnována morfografii povrchu Venuše se záměrem charakterizovat hlavní morfostrukturní tvary a typy reliéfových procesů, kterými vznikaly.

Fyzikální a chemické procesy probíhající v jednotlivých sférách planety podstatným způsobem ovlivnily vývoj povrchových tvarů Venuše. Morfografické členění povrchových tvarů Venuše je dokumentováno globální topografickou mapou a skupinami vybraných snímků dálkového průzkumu povrchu planety. Současný stav poznání topografie Venuše je již možné využívat pro systematické zjišťování původu a intenzity změn povrchu planety, a to zejména při dlouhodobém vytváření její horninové kůry působením endogenních procesů. Dokumentace těchto morfogenetických procesů a jevů v dosud publikovaných výsledcích kosmických misí byla podnětem pro návrh morfostrukturní interpretace hlavních typů povrchových tvarů Venuše.

Klíčová slova: morfostrukturní tvary a procesy, planeta Venuše, přírodní prostředí

Abstract

In the paper the current state of knowledge about the natural environment of planet Venus is described. The present state of affairs was determined by studies and evaluation of available data in specialized publications. The aims of presented bachelor thesis are in description of the planet as a whole, its atmosphere, landforms and internal structure. Special attention is attended to morphography of the Venus surface with an intention to characterize the main morphostructural landforms and related types of relief-forming processes.

The physical and chemical processes operated in partial spheres of the planet substantially determinate the evolution of its landforms. Morphographical arrangement of landforms on the Venus is documented by a global topographic map and by groups of selected remote sensing images of the planetary surface. The current state of knowledge of the Venus topography can already be used to systematical investigation of the origin and intensity of landform changes, namely during the long-term development of its lithospherical crust by endogenous processes. Documentation of these morphogenetic processes and phenomena in up to the present published results of space missions was a stimulus for the proposal of morphostructural interpretation of main types of the Venus landforms.

Keywords: morphostructural landforms and processes, planet Venus, the natural environment

Obsah

Seznam obrázků, tabulek a příloh	7
Seznam zkratk.....	13
1 Úvod.....	14
1.1 Cíle práce a použité metody	14
1.2 Historie výzkumu Venuše.....	15
2 Fyzikální charakteristika planety Venuše a její postavení ve Sluneční soustavě.....	19
3 Vnitřní stavba planety Venuše	24
4 Současný stav a vývoj atmosféry planety Venuše.....	28
4.1 Atmosféra planety Venuše v minulosti	28
4.2 Stavba a složení současné atmosféry Venuše	30
4.3 Oblačnost, deště a blesky na Venuši.....	34
4.4 Cirkulace v atmosféře Venuše.....	38
5 Topografie a typy reliéfu Venuše.....	42
5.1 Průzkum a mapování povrchu planety	42
5.2 Základní orografické typy reliéfu planety	47
6 Morfostrukturní tvary povrchu Venuše	52
6.1 Morfografie planety a typy morfogenetických procesů.....	52
6.2 Morfostrukturní členění povrchových tvarů Venuše.....	55
7 Diskuze.....	85
8 Závěry	87
Literatura	89
Příloha 1: Přehled historie průzkumu planety Venuše kosmickými sondami	93

Seznam obrázků, tabulek a příloh

Seznam obrázků

Obrázek 1: Kresba z roku 1761, vytvořená M. V. Lomonosovem, znázorňuje jeho pozorování přechodu Venuše přes sluneční disk.

Obrázek 2: Fáze Venuše pozorované v roce 2004 dalekohledem, a to v pozici blízké dolní konjunkci.

Obrázek 3: Fáze Venuše vzhledem k Zemi a její pozorovatelnost.

Obrázek 4: Náčrtek Francesco Fontany, na kterém je zaznamenána přítomnost předpokládaného měsíce Venuše.

Obrázek 5: Porovnání sklonu osy a směru rotace u Země, Uranu a Venuše.

Obrázek 6: Vnitřní stavba Venuše a podrobnější informace o každé z vrstev.

Obrázek 7: Zjednodušený diagram modelování vnitra Venuše znázorňující formování plášťové plumy a radiační teplotní profil.

Obrázek 8: Skutečný stav magnetosféry Venuše.

Obrázek 9: Vliv slunečního větru na stav a tvar magnetosfér Země a Venuše.

Obrázek 10: Diagram vyjadřující dlouhodobou změny množství H_2O a CO_2 v atmosféře Venuše.

Obrázek 11: Porovnání chemického složení atmosfér planet Sluneční soustavy.

Obrázek 12: Diagram průměrného vertikálního teplotního profilu v atmosféře Venuše, zobrazující hlavní procesy a přibližné polohy oblačných vrstev atmosféry.

Obrázek 13: Diagram hlavních charakteristik vrstev oblačnosti Venuše a jejich přibližné polohové rozdělení.

Obrázek 14: Profil střední a spodní částí atmosféry Venuše s profilem oblačnosti této planety.

Obrázek 15: Základní schéma atmosférické cirkulace Venuše.

Obrázek 16: Polární dipóly vírů na Venuši.

Obrázek 17: Mapa Venuše znázorňující vysočiny, roviny a planiny. Diagram ukazuje procentuální zastoupení těchto orografických typů povrchu planety.

Obrázek 18: Topografická mapa severní a jižní polokoule Venuše je od 0 do 75° šířky sestavena v Merkatorově zobrazení a od 75 do 90° šířky je v azimutálním Lambertově zobrazení. Projekce sousedních segmentů se překrývají o 2° délky a některé tvary jsou zobrazeny dvakrát. Na této mapě jsou uvedeny názvy povrchových tvarů povrchů, schválené Mezinárodní astronomickou unií.

Obrázek 19: Hemisférické pohledy na povrch Venuše, vytvořené pomocí radarových snímků ze sondy Magellan, a topografie povrchu, odvozená pomocí radarového výškoměru sondy Magellan.

Obrázek 20: Schéma hlavních tektonických režimů vytváření povrchu Venuše.

Obrázek 21: Rozsáhlá duna o šířce přibližně 36 km a s výškami od 15 do 95 m. Nápadné pruhy vznikají silným prouděním vzduchu v oblasti Al-Uzza Undae. Žlutá linie byla použita pro sestavení radaro–klinometrického profilu a pro určení výšky duny nad okolním reliéfem Venuše.

Obrázek 22: Tři rozsáhlé impaktní krátery v oblasti Lavinia Planitia.

Obrázek 23: Polygenetický reliéf oblasti Bereghinia Planitia s pestrým komplexem povrchových tvarů vulkanického původu. Ve středu snímku je nápadný lávový proud rozčleněný povrchovou sítí zlomů.

Obrázek 24: Topografická mapa oblasti Aphrodite Terra.

Obrázek 25: Topografická mapa oblasti Ishtar Terra.

Obrázek 26: Oblast Aphrodite Terra má velmi členitý povrch, který je tvořený tesserou s nápadnými hřebeny a údolími.

Obrázek 27: Oblast Ishtar Terra s Maxwell Montes. Snímek byl vytvořen zpracováním dat z kosmických sond Venera 15 a Venera 16.

Obrázek 28: Oblast Ishtar Terra, v jejíž východní polovině jsou nápadné členité hřebeny Fortuna Tessera.

Obrázek 29: Členitý reliéf komplexu morfostrukturních tvarů vulkanického původu v oblasti Alfa Regia.

Obrázek 30: Lávové proudy na tektonicky rozčleněných plošinách v západní části Eistla Regia s výraznými sopečnými masivy Gula Mons a Sif Mons.

Obrázek 31: Sopečné masivy Rhea Mons, Thea Mons a Devana Chasma v centrální části Beta Regia mají nápadnou mozaiku lávových proudů a lineamentů disjunktivní tektoniky.

Obrázek 32: Složená série snímků z mise Magellan zobrazuje severní část Lakshmi Planum, která leží ve výšce cca 3,5 km nad středním poloměrem planety. V jižní části obrázku je zobrazen tektonicky intenzivně rozčleněný reliéf Clotho Testera. Kruhová deprese Siddons je pravděpodobně sopečnou kalderou.

Obrázek 33: Rozsáhlá riftová zóna Devana Chasma v centrální části Beta Regia je přibližně 1 050 km dlouhá a 80–240 km široká.

Obrázek 34: Členitý reliéf v oblasti Latona Corona má až 3 km hluboká koryta Dali Chasmu a morfologicky výraznou síť zlomů na ploše více než 7 400 km².

Obrázek 35: Lávové kanály vytvořené na mírně členitém povrchu plošiny Sedna.

Obrázek 36: Údolí Baltis Vallis je pokládáno za nejdelší (dosud známý) útvar tohoto druhu v celé sluneční soustavě. Má šířku cca 2 km a délku přes 7 000 km, vzniklo vulkanickou činností a jeho dno zčásti leží pod nejmladšími lávovými proudy.

Obrázek 37: Složitě uskupení povrchových tvarů na planině Ulfrun Regio má nápadné lineární útvary brázd a koryt Bellona Fossae, které jsou pravděpodobně zčásti vyplněné lávovými proudy.

Obrázek 38: Rozvětvená síť zlomů Hestia Rupes na severozápadním okraji Aphrodite Terra má délku přes 50 km a je umístěna v systému lávových proudů s projevy starší zlomové tektoniky.

Obrázek 39: Příklad světlých a tmavých areálů litologicky různých vulkanických hornin rozčleněných mozaikou zlomů na hřbetech lávových proudů Wrinkle Ridges.

Obrázek 40: Sopka Maat Mons s výškou kolem 8 km (3D model, 1991) je tvořena mohutným centrálním masivem s výraznými projevy svahových pohybů, který je obklopen rozsáhlými, stovky kilometrů dlouhými lávovými proudy s členitým reliéfem a četnými zlomy.

Obrázek 41: Sopka Gula Mons s výškou 3 km (3D model, 1991) vznikla v oblasti Eistla Regio opakovanými výlevy bazaltických láv s velkou viskozitou. Její skalnaté svahy jsou erodovány eolickou činností.

Obrázek 42: Sopečný masiv Sif Mons (3D model, 1991) má výšku 2 km a poloměr mohutných lávových výlevů cca 300 km. Ve zvlněném reliéfu lze odlišit (tmavé) starší lávové proudy, vrstevní plochy hornin (pravděpodobně) čedičového typu a síť zlomů.

Obrázek 43: Sopečný masiv Irnini Mons má vyvinutou výraznou kalderu a zlomové zóny lineárního a síťového typu. Tento masiv byl objeven v centrální části Eistla Regio.

Obrázek 44: Sopka Justitia Tholus s kalderou v centrální části má téměř kruhově symetrické výlevy láv a sekundární zlomové systémy. Rozsáhlý masiv je umístěn na planině Helen Planitia ležící na jižní polokouli Venuše.

Obrázek 45: Kombinace několika typů zlomových sítí v okolí centrální části sopky Toci Tholus s kruhovým kráterem a členitým reliéfem. Tento sopečný masiv byl objeven na planině Sedna Planitia ležící na severní polokouli Venuše.

Obrázek 46: Celkový pohled na skupiny menších sopečných útvarů a lávové proudy různého stáří v oblasti Olosa Colles.

Obrázek 47: Výrazná skupina sedmi sopečných útvarů typu „pancake dome“ v oblasti planiny Alfa Regio s klenbou viskózních láv o průměru cca 25 km a výškou až 750 m. V okolí sopečných dómů i přímo na jejich povrchu jsou nápadné jak lineárně uspořádané zlomové zóny, tak složité mozaiky zlomových sítí.

Obrázek 48: Nápadná skupina tří sopek typu „pancake dome“ nazvaná Carmenta Farra.

Jedná se o kruhové a poměrně ploché sopečné útvary, přičemž největší z nich má poloměr 65 km a je cca 1 km vysoký. Malý kráter ve středu každé klenby je pravděpodobně zdrojovým kráterem lávových proudů. V pravém horním rohu snímku z roku 2015 je zaznamenán impaktní kráter Margareta. Carmenta Farra je umístěna v centrální části Eistla Regio.

Obrázek 49: Snímek vulkanického útvaru „pancake dome“ na planinách východní části Alpha Regio (3D model, 1991) znázorňuje zlomy rozčleněné klenby lávových proudů.

Obrázek 50: Členitý reliéf oválné koróny v oblasti Ovda Regio se vyznačuje radiálními zlomy a hřebeny, sopečnými krátery a lávovými proudy. Průměr centrální části koróny je cca 80 km a její deprese je o 3 km nižší než okolní hřbety. Předpokládá se, že centrální deprese koróny vznikají narušením pevné kůry proniknutím horkého magmatu k povrchu a jsou vymezeny oválnými zlomovými zónami. Tyto vulkanické procesy pokračují zejména rozsáhlými výlevy láv a vznikem sítě radiálních zlomů.

Obrázek 51: Zlomovými zónami rozčleněné hřbety lávových proudů v 500 km široké koruně Atete Corona zjištěné v oblasti Galindo.

Obrázek 52: Typické morfostrukturní uspořádání povrchových tvarů koróny na Venuši. Jedná se o kruhový útvar Aine Corona s poloměrem cca 200 km. Několik generací kruhových a lineárních zlomových zón rozčleňuje platformní i kruhové vulkanické masivy, včetně menších kopulí („palačinkové domy“) a nejmladších lávových proudů. Aine Corona je umístěna v jižní části Aphrodite Terra.

Obrázek 53: Rozsáhlá kaldera sopečného masivu Sacajawea Patera byla objevena na planině Lakshmi Planum v západní části Ishtar Terra. Tato kaldera má šířku cca 420 km, hloubku 1–2 km a rozměry 120 x 215 km. Výrazná deprese v centrální části kaldery je vymezena obvodovými zlomovými strukturami. Vznik této kaldery je popisován jako povrchový projev zhroucení magmatické komory a lokální gravitační relaxací kůry planety.

Obrázek 54: Snímek členitosti morfostrukturního útvaru „pavoučí síť“ Arachnoid Trorula Corona s průměrem cca 200 km.

Obrázek 55: Výrazná kruhová struktura Alta arachnoid s paprscitě se rozbíhajícími zlomovými zónami a hřbety lávových proudů, která byla identifikována na sz. planinách Alta Regia. Tento komplex arachnoid má průměr centrální deprese cca přes 90 km a jeho uspořádání reliéfu je typické pro dosud zjištěné morfostrukturní útvary tohoto druhu na Venuši.

Obrázek 56: Mohutné pole lávových proudů Mylitta Fluctus, které se rozkládá až 1000 km na sever od zdrojové oblasti, má šířku cca 460 km a ve směru od severu k jihu klesá o 2000 m. Soustava těchto lávových proudů vznikala postupně, a to pravděpodobně v 6 samostatných erupcích jedné zdrojové oblasti velké štítové sopky.

Obrázek 57: Sopečný kráter Alcott byl téměř zaplaven mladšími lávovými proudy. Nejsvětlejší zabarvení povrchu lávy na jv. okraji kráteru je příkladem útvarů označovaných jako „radar-bright ejecta“. Kráter Alcott je umístěn severně od Lada Terra na jižní polokouli Venuše.

Obrázek 58: Největším impaktním kráterem na Venuši je Mead Crater s poloměrem (světlé) kruhové části 280 km. Tento impaktní kráter má vyvinuty dva prstence hřbetů, které vystupují nad starší lávové povrchy planiny a několik generací zlomových zón. Kráter je umístěn na západním okraji Aphrodite Terra.

Obrázek 59: Impaktní kráter Danilova s prstencem hřbetů má v centru kruhové deprese vyvinutou skupinu pahorků, tvořenou pravděpodobně magmatem uvolněným dopadem impaktoru. Členité svahy vnějších částí okrajových hřbetů tohoto impaktního kráteru se asymetricky sklánějí na starší lávové pokryvy planiny. Impaktní kráter Danielova je umístěn na planinách Venuše, přičemž na východě leží Dione Regio a na západě od kráteru leží Alpha Regio.

Seznam tabulek

Tabulka 1: Povrchové útvary Venuše, jejich nomenklatura a původ ženských jmen.

Seznam příloh

Příloha 1: Přehled historie průzkumu planety Venuše kosmickými sondami.

Seznam zkratk

AU	astronomická jednotka
DAVINCI	Deep Atmosphere Venus Investigation of Noble gases, Chemistry, and Imaging
ESA	European Space Agency
ИКИ РАН	Институт космических исследований Российской академии наук
NASA	National Aeronautics Space Administration
př. n. l.	před naším letopočtem
s. š.	severní šířka
UV spektrum	ultrafialový spektrum
UV záření	ultrafialové záření
VERITAS	The Venus Emissivity, Radio Science, InSAR, Topography, and Spectroscopy mission
VMC	Venus Monitoring Camera
v. d.	východní délka

1 ÚVOD

1.1 Cíle práce a použité metody

Planeta Venuše byla pozorována pravděpodobně od pravěku a astronomy byla systematicky sledována již několik staletí. Teprve na počátku kosmického věku se však mohlo uskutečnit zkoumání planety Venuše kosmickými sondami, což vedlo k rozsáhlému sběru dat a dalších informací o stavu přírodního prostředí této planety. V současné době probíhá zejména analýza a interpretace údajů získaných dálkovým průzkumem Venuše, je také projektován podrobnější průzkum jejích jednotlivých sfér.

Tato bakalářská práce je souhrnem dostupných poznatků o přírodním prostředí planety Venuše a popisem jejích současného stavu. Informace o planetě a jejím přírodním prostředí byly získány z odborných publikací v českých a zahraničních časopisech a další odborné literatury. Hlavním cílem bakalářské práce je charakteristika planety Venuše jako celku a jejích jednotlivých částí: atmosféry, povrchu a vnitřní stavby. Atmosféra planety je nejlépe prostudována ze všech sfér Venuše a naopak nejméně poznatků je k dispozici o její vnitřní stavbě. Zvláštní pozornost je v této práci věnována morfografii povrchu Venuše se záměrem charakterizovat hlavní morfostrukturní tvary a typy reliéfových procesů, kterými vznikaly.

Pracovní metody při řešení hlavních zadaných cílů bakalářské práce spočívaly v systematické rešerši dostupných odborných publikací a specializovaných elektronických zdrojů s následným analytickým zpracováváním a uspořádáním vybraných dostupných údajů o planetě a jejích jednotlivých přírodních sférách. Tyto údaje byly prostudovány zejména s ohledem na poznávání povrchu planety, na charakteristické procesy probíhající v atmosféře a ve vnitřních částech planety a jejich vlivu na změny povrchových tvarů Venuše.

Další pracovní metodou, která mohla být v průběhu přípravy této specifické studie o přírodním prostředí jedné z terestrických planet využita, byla tematicky zaměřená prohlídka a výběr (zveřejněných) snímků z dálkového průzkumu Venuše. V planetologických výzkumech je princip tohoto přístupu založen na porovnávání, případně i na hlubší korelaci dokumentace o sledované planetě se známými přírodními procesy, jevy a povrchovými tvary na Zemi.

První kapitola je zčásti věnována i přehledu historie výzkumu planety Venuše. Hlavním cílem budoucích (projektovaných) kosmických misí je zjistit další podstatné informace o stavu přírodního prostředí Venuše, o její geologické historii a vývoji povrchových tvarů. V hlavních kapitolách této práce jsou popsány jednotlivé přírodní sféry planety a dosavadní

poznatky o jejich vývoji a současných procesech. Fyzikální a chemické procesy probíhající v jednotlivých sférách planety podstatným způsobem ovlivnily vývoj povrchových tvarů planety Venuše. Z tohoto důvodu jsou uvedeny základní charakteristiky této planety terestrického typu, dále současný stav poznatků o její vnitřní stavbě a atmosféře.

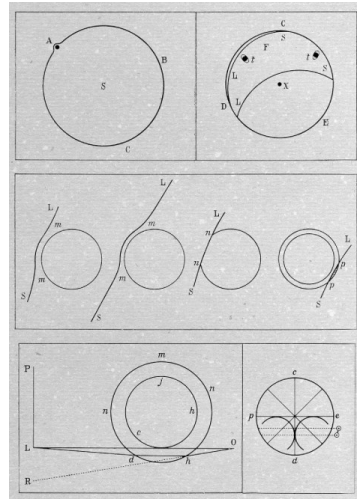
Významným výsledkem kosmického výzkumu Venuše bylo vytvoření celkového záznamu topografie této planety, což umožnilo popsat (a pojmenovat) základní typy jejího reliéfu. Morfografické členění povrchových tvarů Venuše je dokumentováno globální topografickou mapou a skupinami vybraných snímků dálkového průzkumu povrchu planety. Současný stav poznání reliéfu Venuše je již možné využít pro systematické zjišťování původu a intenzity změn povrchu planety, a to zejména při dlouhodobém vytváření její kůry. Dokumentace těchto morfogenetických procesů, které mají být jedním z tematických okruhů výzkumů dalších projektovaných kosmických misí, je základem návrhu morfostrukturní interpretace topografie a hlavních typů reliéfu Venuše.

1.2 Historie výzkumu planety Venuše

Období objevu planety Venuše není přesně známé, pravděpodobně to však bylo v 8. nebo 7. století př. n. l. Antické civilizace nejdříve pokládaly tuto planetu za dva různé objekty. V textech řeckého básníka Hésioda byly popsány dvě božské bytosti – dva bratři Fosforos a Hesperos – odpovídající „jitřence“ a „večernici“. Později Pythagoras přiřadil tyto jevy k pohybu jediné planety, a to Venuše, kterou popsal jako „druhé Slunce, bílé záření, které informuje lidstvo o začátku dne a noci“. Venuše je jediná planeta, která byla pojmenována podle bohyně, a nikoliv podle boha, jako je tomu u většiny planet ve Sluneční soustavě. Jedná se o jméno římské bohyně krásy a lásky Venuše, tedy původně řecké bohyně Afrodity.

Vynález dalekohledu přinesl nové poznatky o planetě Venuši. Prvním, kdo použil dalekohled k astronomickým účelům, byl pravděpodobně Galileo Galilei (1629–1695), který v roce 1610 pozoroval svým dalekohledem jednotlivé fáze Venuše. V roce 1677 anglický astronom Edmund Halley navrhl použít pozorování přechodu Venuše přes sluneční disk pro určení vzdálenosti mezi Sluncem a Zemí resp. hodnoty astronomické jednotky (AU). Po jeho smrti v roce 1761 byla provedena pozorování při přechodu planety Venuše přes sluneční disk. Z těchto pozorování byla získána přibližná hodnota AU a to je přibližně 95 milionů mil, což je blízké hodnotě AU podle současných měření, tedy 92 955 807,267 mil (149 597 870, 691 km) [1].

Další podstatné pozorování bylo uskutečněno 6. června roku 1761, kdy Michail Vasiljevič Lomonosov při pozorování přechodu Venuše přes sluneční disk objevil atmosféru této planety. Pozorování atmosféry bylo zakresleno M. V. Lomonosovem (obr. 1).



Obrázek 1: Kresba z roku 1761, vytvořená M. V. Lomonosovem, znázorňuje jeho pozorování přechodu Venuše přes sluneční disk.

(zdroj: http://www.wikiwand.com/ru/Пролохождение_Венеры_по_диску_Солнца)

Po tomto objevu atmosféry planety Venuše ve druhé polovině 18. století se získávání nových poznatků soustředilo hlavně na stav její atmosféry. Dříve byla Venuše považována za dvojče planety Země, a to pro podobnost velikosti a hmotnosti planet. Studium atmosféry Venuše podpořilo hypotézu o podobnosti planet.

V roce 1932 T. S. Adams a T. Duhman [2] zjistili přítomnost oxidu uhličitého v atmosféře. Tento objev posloužil jako důkaz hypotézy, že pod hustou vrstvou atmosféry se vyskytuje povrch tělesa s vrstvou vody, ve které se rozvíjí život podobným způsobem, jak to probíhalo na Zemi. Avšak zjištění přítomnosti oxidu uhličitého paradoxně podporuje i opačnou hypotézu, že povrch Venuše může být suchou a horkou pouští [2]. Ve druhé polovině 20. století byly představy o podobnosti přírodních prostředí obou planet Venuše a Země téměř zcela vyvráceny na základě velkého množství nových pozorování.

V roce 1961 bylo provedeno první radarové určení vzdálenosti Venuše od Země. 4. února 1961 také proběhlo zahájení prvního pokusu o vyslání sondy pro průzkum Venuše, a to sovětské sondy Sputnik 7. Start rakety Molnija proběhl úspěšně z kosmodromu Bajkonur. Raketa dosáhla nízkou oběžnou dráhu, avšak pro selhání dodávky elektrického proudu k motorům nedosáhla nosná raketa potřebné trajektorie pro cestu k Venuši [3]. Kosmická

sonda Sputnik 7 zůstala na oběžné dráze Země a po 22 dnech sonda shořela v atmosféře Země.

Kosmická sonda Venera 1 byla vypouštěna hned po sondě Sputnik 7, a to 12. února 1961. Venera 1 se stala první planetární sondou, která proletěla v blízké vzdálenosti od Venuše. Bohužel tento pokus byl také neúspěšný. Spojení s touto sondou bylo ztraceno při její vzdálenosti cca 2 miliony km od Země [4].

První úspěšnou misí vyslanou pro průzkum přírodního prostředí Venuše byla americká přeletová planetární sonda NASA – Mariner 2. Start se uskutečnil 27. srpna 1962, 14. prosince 1962 sonda proletěla nad planetou Venuše ve výšce 34 773 km [4]. Byla naměřena povrchová teplota 428 °C (800 °F), ale nebyl zjištěn obsah žádných vodních par ani existence magnetického pole planety. Spojení se sondou Mariner 2 bylo ztraceno 3. ledna 1963.

Během posledních 60 let bylo vysláno 40 sond Sovětským svazem, USA, Japonskem a Evropskou kosmickou agenturou. V příloze 1 je uveden přehled průběhu, cílů a důležitých informací o výzkumných programech a kosmických sondách, vyslaných na průzkum planety Venuše.

V současné době probíhá pouze jedna výzkumná mise planety Venuše, kterou je japonská sonda AKATSUKI. Start této sondy proběhl 20. května 2010, a v prosinci 2010 měla dosáhnout oběžné dráhy planety Venuše. Původně bylo plánováno, že se japonská mise protáhne jenom o 2 roky. Ale kvůli nesprávné navigaci sondou nebyla dosažena potřebná trajektorie letu a sonda AKATSUKI se dostala na oběžnou dráhu planety až v prosinci 2015 [4]. Hlavním cílem této mise jsou studium dynamiky atmosféry, sledování rozložení oblaků a menších plynných složek v různých výškách (výškou v této práci je myšlena výška od referenční hladiny planety Venuše), pozorování projevů rotace planety a hledání aktivních sopek na Venuši. V dubnu 2016 byly ze sondy přeneseny první snímky Venuše v UV spektru, na nichž byla objevena oblaka tvořena kyselinou sírovou. Většina dat z této mise není zatím veřejně dostupná a předpokládá se, že japonská kosmická sonda bude sbírat a poskytovat data až do roku 2019.

Blízko k zahájení jsou dvě mise NASA, a to VERITAS a DAVINCI, jejichž start je naplánován na rok 2020. VERITAS je projektem vytvoření topografických map povrchu Venuše vyššího rozlišení a konstrukce map členitosti povrchu. DAVINCI je zejména projektem průzkumu chemického složení atmosféry Venuše a vyhledání aktivních sopek [5].

Přes poměrně velké množství úspěšných misí a získaných dat o planetě Venuši (příloha 1), stále není k dispozici komplexní informace a tím méně teorie o vzniku a vývoji

planety, stavu její vnitřní struktury, povrchových tvarech a o celkové stavbě atmosféry. Pro další výzkum planety Venuše je připravován společný projekt USA a Ruska, nazvaný mise „Venera D“. Tato mezinárodní mise je plánována ruským Institutem kosmického průzkumu (Ruská akademie věd) a Roskosmosem s podporou výzkumného týmu NASA. Start této kosmické mise je naplánován na rok 2029 až 2031. Venera D má být kosmickou stanicí na oběžné dráze Venuše, zároveň se připravuje i přistávací modul na povrch planety a dva balony, které mají vykonávat pozorování ve výškách 45–50 a 55 až 60 km. Hlavním pokrokem při porovnání s předchozími misemi má být současné měření a výzkum jak na oběžné dráze planety Venuše, tak i na jejím povrchu [6]. Hlavní cíle jsou studium dynamického stavu atmosféry, mechanismu super rotace, skleníkového efektu, procesu vzniku oblaků SO₂ a případně i vyhledání aktivních sopek, dále výzkumy elektromagnetické a seismické aktivity na Venuši.

2 FYZIKÁLNÍ CHARAKTERISTIKA PLANETY VENUŠE A JEJÍ POSTAVENÍ VE SLUNEČNÍ SOUSTAVĚ

Planeta Venuše je v pořadí od Slunce druhá planeta a také druhá ze skupiny vnitřních nebo terestrických planet (Vanýsek 1980). Zemi je z planet nejbližší a obíhá po eliptické dráze, která je blízká kruhové, kolem Slunce a její dráha má výstřednost menší než 0,01 ($e = 0,0068$). Vzdálenost Venuše od Slunce je 108 200 000 km, tj. 0,7233 AU (Vanýsek 1980). V perihéliu je Venuše 107 480 000 km od Slunce a v aféliu je 108 940 000 km od Slunce [7]. Siderická doba oběhu planety je 224,701 středních solárních dnů [8] a rok je tedy na Venuši podstatně kratší než pozemský.

Rotace planety Venuše kolem své osy je v určitém smyslu unikátní. Venuše a Uran jsou jediné dvě planety Sluneční soustavy, které mají retrogradní rotace kolem své osy, tj. otáčí se opačným směrem než Země. Venuše rotuje ve směru od východu k západu namísto od západu k východu jako většina ostatních planet Sluneční soustavy. Důvody retrogradní rotace planety Venuše nejsou známy, předpokládá se, že se jedná o následek slapového působení její velmi husté atmosféry (Correia et al. 2003). Doba zpětného oběhu planety kolem své osy (hvězdná doba oběhu) trvá 243,025 pozemských dnů (Vanýsek 1980). Výsledkem porovnání dne a roku na planetě je tedy závěr, že hvězdný den Venuše je delší než siderický rok. To je způsobeno pomalou rychlostí retrogradní rotace planety Venuše ($6,5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) [7], která má nejdélší rotační periodu ze všech planet Sluneční soustavy. Sluneční den je obecně doba, za kterou se Slunce vrátí na stejné místo na obloze. Sklon rotační osy planety Venuše k rovině oběžné dráhy kolem Slunce je pouze $2,64^\circ$ (zatímco sklon retrogradní rotace osy je pořád $177,36^\circ$) (Vanýsek 1980). Kombinace hvězdného dne a sklonu rotační osy k rovině oběžné dráhy planety určuje délku trvání slunečního dne na Venuši, a to 116,8 pozemských dnů [9]. Bílý den je stejně dlouhý jako noc na planetě a trvá 58 dnů. Je nápadné, že synodická doba oběhu Venuše, tj. vzhledem k Zemi, a interval, který uplyne mezi dvěma po sobě následujícími vrcholeními Země pro určitý cythereální poledník (146 dní), jsou v poměru 1:4 (Vanýsek 1980). To vede k domněnce, že existuje vazba rotace Venuše na Zemi zprostředkovaná slapovými silami (Vanýsek 1980).

Střední vzdálenost Venuše od Země je 41 000 000 km, tj. 0,28 AU, takže Venuše je Zemi z planet nejbližší. Vzdálenosti mezi planetami nejsou stále stejné vzhledem k pohybu planet po oběžných dráhách kolem Slunce. Z tohoto důvodu se Venuše přibližuje každých 584 dní na minimální vzdálenost od Země, a to 38 200 000 km [8]. Naopak největší vzájemná

vzdálenost obou planet, která byla dosud zjištěna, byla 261 000 000 km, tedy více než 1,7 AU [8].

Planeta Venuše je třetím nejjasnějším objektem na obloze po Slunci a Měsíci. Hvězdná velikost planety se na noční obloze pohybuje mezi -3,1 a -4,6 magnitudy (Kleczek 2002). Vzhledem k své husté a nepropustné atmosféře má Venuše vysoké albedo (0,77), světlešedé až bílé zbarvení a lze ji pozorovat pouhým okem. Venuše se nachází blíže ke Slunci než Země, takže má výrazné projevy elongace s maximem 47,8° [10]. Venuše vychází na obloze dříve a zapadá později než Slunce, takže je nazývána „jitřenka“ a „večernice“.

Na oběžné dráze kolem Slunce se planeta Venuše dostává do několika fází (obr. 2), které poprvé byly pozorované a popsány v roce 1610 G. Galileem (Vanýsek 1980).

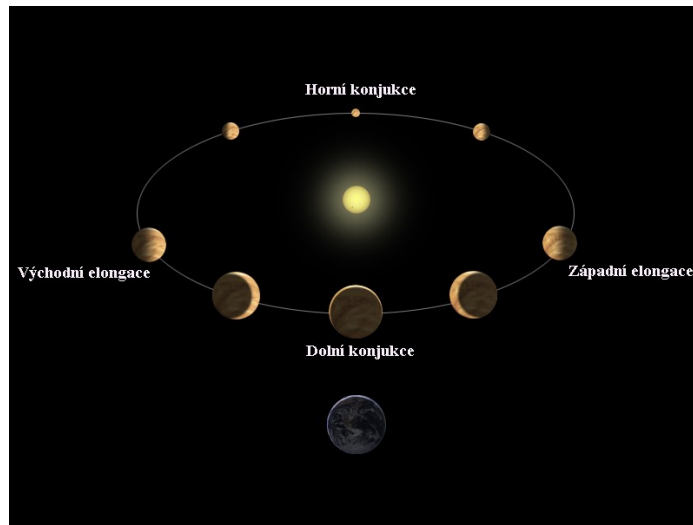


Obrázek 2: Fáze Venuše pozorované v roce 2004 dalekohledem, a to v pozici blízké dolní konjunkci (2004).

(zdroj: <https://www.universetoday.com/36687/rotation-of-venus/>)

Fáze Venuše se mění v průběhu oběhu planety kolem Slunce (obr. 3), přičemž tento cyklus odpovídá délce synodického roku Venuše 583,92 dnů. V horní konjunkci se Venuše nachází za Sluncem a je v úplňku. Nejjasnější je planeta na noční obloze v období mezi západní elongací, ke které dochází cca 37 dní před dolní konjunkcí, anebo východní elongací, která nastává 37 dní po dolní konjunkci [11]. V těchto obdobích je Venuše 15x jasnější než nejjasnější hvězda zemské oblohy Sirius (Čeman, Pittich 2002). Venuše je v období mezi západní a východní elongací v poloviční fázi, může být viditelná i za plného denního

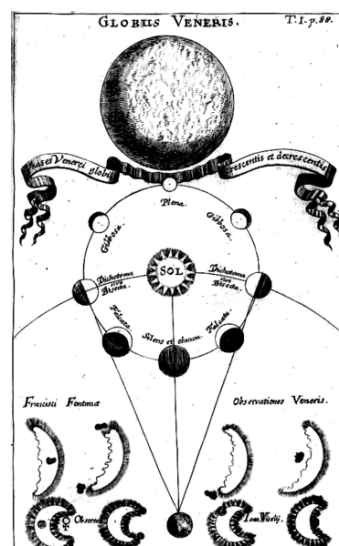
světla a v průběhu dolní konjunkce občas dochází k přechodu (tranzitu) této planety přes sluneční disk.



Obrázek 3: Fáze Venuše vzhledem k Zemi a její pozorovatelnost (2008).

(zdroj: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Venuše_\(planeta\)#/media/File:Phases_of_Venus_cs.png](https://cs.wikipedia.org/wiki/Venuše_(planeta)#/media/File:Phases_of_Venus_cs.png))

Podobně jako planeta Merkur nemá Venuše žádný měsíc, přičemž v 19. století ještě existovala představa, že měsícem Venuše by mohl být Merkur (Yazev 2011). Od roku 1645 bylo provedeno mnoho pozorování a hledání možných měsíců planety Venuše. Například neapolský astronom Francesco Fontana objevil v 17. století přítomnost nějaké hvězdy nebo jiného tělesa vedle této planety, což zakreslil do náčrtku (obr. 4).



Obrázek 4: Náčrtek Francesco Fontany, na kterém je zaznamenána přítomnost předpokládaného měsíce Venuše (1696).

(zdroj: https://ru.wikipedia.org/wiki/Спутнику_Венеры#/media/File:Zahn_-_Globus_Veneris.png)

V současné době je známo, že kolem Venuše obíhá asteroid 2002–VE68, tak zvaný kvazisatelit (Mikkola et al. 2004), který má s Venuší tzv. kvaziorbitální vztah. Oběžné dráhy planety Venuše a asteroidu 2002–VE68 kolem Slunce trvají stejnou dobu, liší se však výstřednosti oběžných drah [12]. Vzhledem ke společnému pohybu kolem Slunce se zdá, že uvedený asteroid obíhá retrográdně kolem Venuše. Kvazisatelit obíhá Venuši již přibližně 7000 let a bude pravděpodobně obíhat po trajektorii oběžné dráhy planety ještě 500 let (Mikkola et al. 2004).

Astronomové v populární literatuře obecně píší o Venuši jako o „sestře“ Země, a to vzhledem k její podobnosti v některých fyzikálních vlastnostech. Velikostí je Venuše do určité míry podobná Zemi, protože má poloměr přibližně 6051,8 km [7]. Většina planet Sluneční soustavy se otáčí kolem své osy s větší rychlostí než Venuše, což způsobuje mírné vyklenutí planety v oblasti jejich rovníku a ke zploštění na pólech. Vzhledem k menší rychlosti rotace je Venuše v podstatě sférickým tělesem (Redd 2012a).

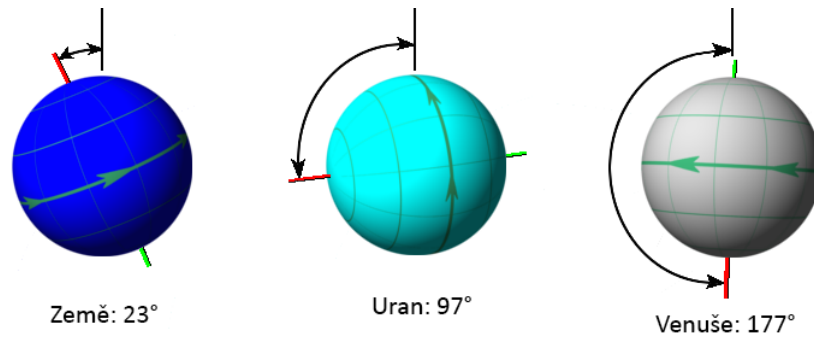
Venuše patří do skupiny kamenných planet (Vanýsek 1980) a má hmotnost $4867,5 \cdot 10^{24}$ kg, tedy 81,4 % zemské hmotnosti [8] a [9].

Podobnost Venuše a Země v poloměru a hmotnosti vede též k odhadu podobné hodnoty střední hustoty planety Venuše, a to $5,25 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ [9], přičemž střední hustota Země je $5,52 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. Tíže na povrchu Venuše přibližně odpovídá 90 % gravitace na Zemi [8]. Objem planety Venuše je $92,843 \cdot 10^{10} \text{ km}^3$, což odpovídá 86 % zemského objemu.

Atmosférický tlak při povrchu planety Venuše je vysoký a dosahuje až 9,2 MPa [7]. Takový tlak atmosféry Venuše zničil několik sovětských kosmických sond, které měly přistát na povrchu planety. Odpovídá totiž přibližně tlaku vody na Zemi v hloubce oceánu 1 km [8].

Teplota atmosféry při povrchu Venuše je pravděpodobně nejvyšší mezi planetami Sluneční soustavy [13]. Její průměrná teplota je $462 \text{ }^\circ\text{C}$ [8], což je způsobeno jak blízkostí Slunce, tak hustou oblačností a vysokým obsahem oxidu uhličitého (96,5 %) a malým podílem dusíku ve složení atmosféry [13]. Nejvyšší teploty při povrchu planety dosahují $482 \text{ }^\circ\text{C}$, tedy vyšší než teplota tavení olova [9]. S rostoucí výškou nad povrchem Venuše se teplota atmosféry snižuje. V horních vrstvách atmosféry dosahují teploty hodnot od $-43 \text{ }^\circ\text{C}$ do $-173 \text{ }^\circ\text{C}$ (Redd 2012b).

Během roku nedochází na Venuši k podstatným změnám a výkyvům teplot. Denní a noční teploty atmosféry planety jsou téměř shodné, což je zejména důsledkem malé rychlosti rotace planety kolem své osy. Navíc má Venuše malý úhel sklonu rotační osy k ose roviny její oběžné dráhy kolem Slunce (obr. 5). Tyto parametry způsobují poměrně stálou teplotu planety v průběhu roku a malé změny a rozdíly teplot mezi rovníkem a póly Venuše.



Obrázek 5: Porovnání sklonu osy a směru rotace u Země, Uranu a Venuše (2015).
 (zdroj: <https://slideplayer.com/slide/7109762>)

Magnetické pole Venuše je podstatně slabší než magnetické pole Země. Předpokládá se, že slabá magnetosféra může být způsobena pomalou rotací planety anebo absencí konvekce v jádru této planety [14]. Magnetické pole Venuše poskytuje tedy zanedbatelnou ochranu proti kosmickému záření (Taylor et al. 2018), což v prvních miliardách let po vzniku planety způsobilo, že sluneční vítr odnášel ionty a případně atomy vodíku z atmosféry do meziplanetárního prostoru.

3 VNITŘNÍ STAVBA PLANETY VENUŠE

Planeta Venuše byla sledována od starověku jak pouhým okem, tak později dalekohledy. Pozorování této planety dalekohledy přinášelo zčásti zklamání. Celý povrch Venuše byl zakryt hustou oblačností atmosféry. První pozorovatelé dospěli k názoru, že oblačnost na Venuši vznikla v souvislosti s vlhkým a tropickým prostředím planety a s oceány na jejím povrchu (viz Taylor et al. 2018). Až kosmické mise ve 20. století a později ukázaly, že Venuše je velmi horkou a suchou planetou, s vysokým atmosférickým tlakem na povrchu planety a se slabým magnetickým polem.

Studium vnitřní stavby planet je obtížné, což znamená, že o Venuši máme k dispozici dosud velmi málo informací a neměřených dat (Gilmov et al. 2017; Taylor et al. 2018). Dodnes tedy ještě neexistují dostatečné důkazy o endogenních procesech, které se odehrávají pod povrchem planety Venuše. Předpokládá se, že nitro Venuše je tvořeno jádrem, pláštěm a kůrou planety (obr. 6).



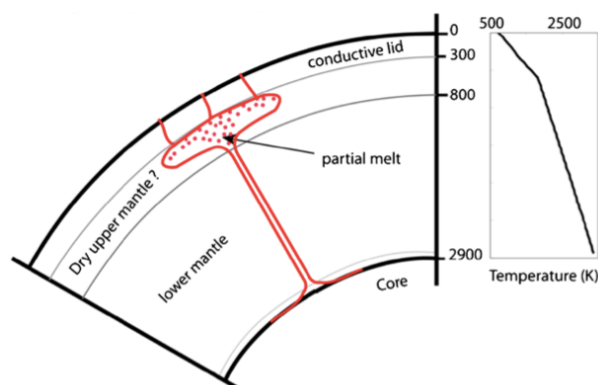
Obrázek 6: Vnitřní stavba Venuše a podrobnější informace o každé z vrstev (2013).

(zdroj: <http://planety.astro.cz/venuse/1926-nitro>)

Pod povrchem planety Venuše se nachází tenká a tuhá kůra, která je pravděpodobně složena z křemičitanových hornin [15]. Povrch planety je tvořen větším počtem vulkanických masivů, což naznačuje vyšší endogenní aktivitu než na zemském povrchu. Další podstatná odlišnost od Země je, že na Venuši není prokázána přítomnost deskové tektoniky (Rajkumov 2014). Pevná kůra Venuše není rozdělena na desky a její stáří se odhaduje na 300–600 milionů let. V tomto období na planetě proběhlo celkové obnovení kůry a vytvoření současně existujících vulkanických hornin na povrchu Venuše (Rajkumov 2014). Více než 85 % povrchu Venuše je pokryto vulkanickými horninami bazaltového, resp. čedičového původu v důsledku velké vulkanické aktivity planety v minulosti. Dosavadní gravimetrické měření planety předpokládají, že Venuše nemá astenosféru a epeirogenetická

členitost povrchu planety je výsledkem dynamických procesů uvnitř jejího pláště. Získání dat o gravitačním poli z mise Magellan v roce 1990 umožnilo provést podrobnější analýzu tloušťky kůry a litosféry vypočítáním vztahu mezi modelem tíže k topografii Venuše. Bylo zjištěno, že průměrná tloušťka kůry se na Venuši pohybuje v rozsahu od 8 do 25 km. Litosféra je pravděpodobně v rozsahu mocnosti od 10 do 40 km (Taylor et al. 2018). Mocnost převážné části kůry byla odhadnuta na 20-25 km s výjimkou oblasti vysočin (Smrekar et al. 2018). Globální analýzou tíhového pole planety a topografie Anderson a Smrekar (2006) odhadli tloušťku kůry Venuše až na 100 km, přičemž většina planety má tyto hodnoty menší než 50 km. Nicméně všechny způsoby poskytují stejné hodnoty odhadu tloušťky kůry. Hustota kůry se odhaduje na $2\,900\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Smrekar et al. 2018) a tato hodnota se směrem k plášti zvětšuje – až do $5\,600\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ [15].

Plášť Venuše je přibližně 3000 km mocný [15] a tvoří většinu objemu planety. Chemické složení pláště není dosud známo. Teplo uvnitř pláště je pravděpodobně způsobeno rozpadem radioaktivních látek, což může znamenat, že by se teploty plášťů Venuše a Země neměly výrazně lišit. Teplo z pláště je na povrch přenášeno konvekcí a s tímto procesem může souviset i vysoká aktivita vulkanismu (Taylor et al. 2018). Hustota pláště byla stanovena na hranici s kůrou na $5\,600\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a až $9\,500\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ na hranici s jádrem. Konvekční procesy v plášti mohou být proměnlivé a nízký obsah vody vede patrně ke vzniku suché a pevné litosféry (dry-upper mantle) (Taylor et al. 2018). Horké proudy lávy vystupující z pláště planety pak vytvářejí sopečné masivy. Přítomnost vulkanické činnosti na povrchu planety a morfologické projevy nedávného vulkanismu na planetě Venuši tak potvrzují existenci strukturálních rozdílů mezi pláštěm a jádrem (obr. 7).



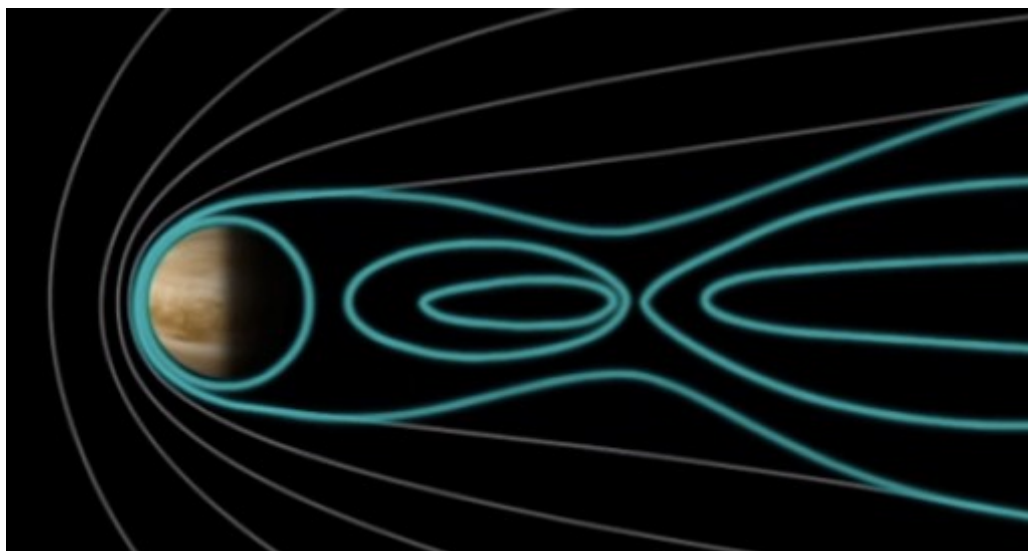
Obrázek 7: Zjednodušený diagram modelování vnitra Venuše znázorňující formování plášťové plumy a radiační teplotní profil (2012). (zdroj: Taylor et al. 2018)

Nejzajímavější částí planety Venuše může být její jádro. Je pravděpodobné, že při podobném složení pláště Země a Venuše je poloměr jádra 51 % planetárního poloměru Venuše (Smrekar et al. 2018). Přesný poloměr jádra Venuše není známý a podle modelů nitra planety je přibližně 3 000–3 100 km. Předpokládá se, že jádro Venuše tvoří 24,8 % celkové hmotnosti planety, což odpovídá cca $1200 \cdot 10^{24}$ kg. Podle výsledků z modelování planety tlak v jádře Venuše dosahuje až 260 GPa [15], což je méně než tlak v zemském jádru (cca 375 GPa). V jádru Venuše je předpokládaná největší hustota planety, a to $11\,500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (Taylor et al. 2018).

Chemické složení planety Venuše také není dodnes známé. Podobnost Země a Venuše a příslušnost Venuše ke skupině terestrických planet slouží jako předpoklad složení vnitřní části planety. V současné době se předpokládá, že jádro Venuše obsahuje nikl a železo. Potvrzení nebo vyvrácení této hypotézy bude možné až po vyslání dalších kosmických misí. Fyzikální a chemický stav jádra Venuše je nejvíce diskutovanou otázkou současnosti. Předpokládá se, že jádro planety má být alespoň částečně kapalné (Taylor et al. 2018). Nejlepší odhad parametru přílivové deformace Venuše Sluncem, provedený podle dat poskytnutých misemi Magellan a Pioneer Venus Orbiter, podporuje hypotézu, že vnější jádro planety je celkově, nebo alespoň částečně z tekutého železa (Konopliv, Yoder 1996; Stevenson 2003).

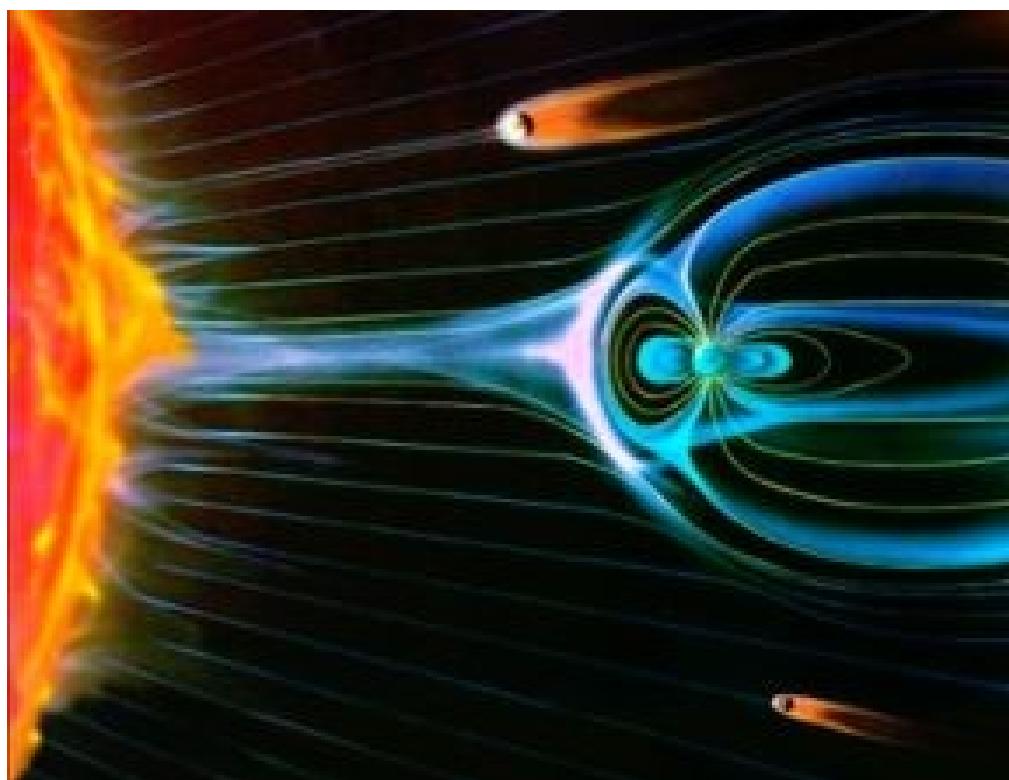
Se stavem a vlastnostmi jádra Venuše je spojeno i dříve zmíněné magnetické pole planety. Jak již bylo zmíněno, absence magnetického pole Venuše mohla být způsobena pomalou rotací planety, avšak podle posledních výsledků modelování i tato rychlost rotace by měla vést ke vzniku „dynamo-efekt“ (Stevenson 2003). Je pravděpodobné, že velmi slabá magnetosféra Venuše svědčí o absenci procesu konvekce v jádru planety. To může být následkem jak absence vnitřního jádra, tak procesů ochlazování jádra planety konvekčními procesy v současné době (Stevenson 2003). Existuje hypotéza [13], že jádro Venuše není dostatečně tekuté, aby konvekce probíhala v centru planety.

Průzkumy planety sondami Mariner 2, Mariner 10 a Venera 4 neobjevily žádný vnitřní „dynamo-efekt“ [5]. Planeta je vůči kosmickému záření chráněna pouze slabým vnějším magnetickým polem, které pravděpodobně pochází z interakce mezi horní atmosférou planety a slunečním větrem. Tato interakce způsobuje elektrické proudy v horní atmosféře Venuše, které vytvářejí i slabé magnetické pole (obr. 8 a 9).



Obrázek 8: Skutečný stav magnetosféry Venuše (2012).

(zdroj: ESA - <http://sci.esa.int/venus-express/50246-a-magnetic-surprise-for-venus-express/>)



Obrázek 9: Vliv slunečního větru na stav a tvar magnetosfér Země a Venuše (2012).

(zdroj: ESA - <http://sci.esa.int/venus-express/50246-a-magnetic-surprise-for-venus-express/>)

4 SOUČASNÝ STAV A VÝVOJ ATMOSFÉRY PLANETY VENUŠE

4.1 Atmosféra planety Venuše v minulosti

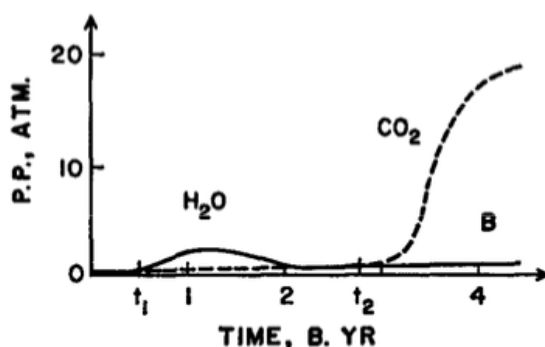
Atmosféra planety Venuše byla objevena v roce 1761 ruským vědcem M. V. Lomonosovem v průběhu sledování velmi význačného astronomického jevu – přechodu planety Venuše přes sluneční disk. M. V. Lomonosov popsal „tenké, jako vlas, záření“, tedy světlý prstenec kolem planety v místech, která ještě nepřišla do kontaktu se slunečním diskem (Lomonosov 1986). Prstenec kolem této planety je optický jev, který způsobuje lom slunečních paprsků v horní atmosféře Venuše. Tento optický jev byl nazván „jevem Lomonosova“. Další výzkum atmosféry byl umožněn až po vyslání sond k Venuši a získáváním dat z přímých měření atmosféry.

Planeta Venuše vznikla podobně jako další planety terestrické skupiny. Začala se vytvářet přibližně před 4,6–4,5 miliardy let akrecí z pracho-plynného disku, který obíhá kolem centrální hvězdy. Modely vzniku planet podobných Venuši ukázaly, že jejich vytváření v blízkosti centrální hvězdy (vzdálené 1–2 AU) trvalo 20 až 30 milionů let. Prachové částice se shlukováním formují na malá tělesa, která vlivem gravitace přitahovala další prachové částice a okolní plyn. Koncem toho procesu došlo ke vzniku 4 terestrických protoplanet, přičemž jednou z nich bylo také primární těleso Venuše. Primární chemické složení atmosféry bylo pravděpodobně podobné u všech protoplanet. Předpokládá se, že z protoplanetární mlhoviny Venuše získala podobné množství tekutých látek jako Země (Raymond et al. 2006). Tato hypotéza ukazuje pravděpodobnost obsahu vody pod povrchem planety a také stav atmosféry v minulosti podobný zemské. Vzhledem k narůstajícímu záření Slunce o 25 % během 3,4 miliardy let mohlo pravděpodobně dojít k odpařování povrchové vody, postupné výrazné změně klimatu a atmosféry planety Venuše (Newman, Rood 1977). Podle radiačně–konvektivních modelů mohla být sluneční energie na oběžné dráze Venuše blízká určité hodnotě, která způsobila únik H_2O z atmosféry Venuše. Kritická teplota, při které dochází k úniku H_2O , je stanovena na 400 °C (674 K, Chassefiere et al. 2012). Povrchová teplota Venuše byla pravděpodobně zvýšena vlivem sluneční energie a prostřednictvím oblačnosti planety. Povrchová teplota planety v té době byla odhadována na 426 °C (700 K), což mohlo zabránit koncentraci vody v atmosféře a způsobit její unik do meziplanetárního prostoru. Primární atmosféra Venuše vznikla následkem vypařování původního vodního oceánu planety a uvolňováním vodních par a vodíku do atmosféry a dále do vesmíru. Přítomnost husté atmosféry s velkým obsahem vodních par v minulosti a jejich následný

postupný únik do meziplanetárního prostoru je pokládán za příčinu vzniku skleníkového efektu, který dodnes můžeme pozorovat na Venuši (Chassefiere et al. 2012).

Současná měření a průzkum reliéfu planety Venuše nevykazují žádné projevy přítomnosti vody. Vypařování původního vodního oceánu pravděpodobně mohlo proběhnout v mladém období vývoje planety, a to je pouze několik set milionů let po jejím vzniku (Chassefiere et al. 2012). Celý povrch planety byl výrazně přetvořen přibližně před 600–700 miliony let. Jedná se o zánik staršího reliéfu, včetně velkých impaktních a sopečných kráterů, velmi rozsáhlou vulkanickou činností. Důsledkem této globální změny reliéfu Venuše je i zničení reliéfových tvarů a dalších projevů přítomnosti vody v dávné minulosti planety.

Pravděpodobně vysoký obsah CO_2 v současné atmosféře Venuše je spojen s geologickým vývojem planety. Pro období Guineverian (od 500 do 300 milionů let před současností) byl charakteristický intenzivní vulkanismus, jehož činností vznikly tabulové roviny, horská pásma a desítky tisíc štítových sopek. Výlevy lávy zaplňovaly roviny a větší část povrchu Venuše. Období Atlian (od 250 milionů let až do současnosti) bylo charakterizováno vznikem sítě zlomů a také další rozsáhlou sopečnou činností (Ivanov, Head, 2013). Plyny CO_2 se postupně a dlouhodobě dostávaly do atmosféry Venuše prostřednictvím vulkanické aktivity a výbuchy sopek. Tyto endogenní procesy způsobily vysoký obsah CO_2 v atmosféře Venuše (obr. 10).



Obrázek 10: Diagram vyjadřující dlouhodobé změny množství H_2O a CO_2 v atmosféře Venuše. (zdroj: Spohn et al. 2014)

Vysoká koncentrace oxidu uhličitého v husté atmosféře Venuše byla příčinou zesílení již existujícího skleníkového efektu. Při něm sluneční paprsky procházejí skrze atmosféru, ale teplo, které se vytvoří jejich rozptylem a dopadem na povrch, již atmosféru neopustí [16]. Skleníkový efekt způsobil narůstání povrchové teploty planety do hodnoty několika set $^{\circ}\text{C}$. Také absence výrazného magnetického pole Venuše pravděpodobně mohla přispět v delším

období k jednoduššímu úniku lehkých plynů do meziplanetárního prostoru. V průběhu vývoje planety Venuše se v atmosféře postupně zvyšovalo množství těžších plynů, jako jsou metany, sulfáty a vzácné plyny.

4.2 Stavba a složení současné atmosféry Venuše

V současné době je atmosféra Venuše hustá a horká. Chemické analýzy, provedené sondou „Venera 4“, ukázaly, že atmosféra je výhradně tvořena oxidem uhličitým CO_2 (až do 96 %). Dále je v ní 3,5 % zastoupen dusík N, přičemž jeho absolutní hodnota je 3x vyšší než v atmosféře Země. Odhad celkového množství uhličitánových hornin na Zemi, které obsahují CO_2 , je téměř stejné jako v atmosféře Venuše (Spohn et al. 2014).

Ve velmi malém množství jsou zastoupeny další plyny a vodní páry, např. obsah oxidu siřičitého SO_2 v husté atmosféře planety je 180 ppm (0,018 %). Poměrně vysoký obsah síry a následně i oxidu siřičitého v atmosféře je poměrně efektivně z atmosféry odstraněn při jejich interakci s povrchem planety. Doba, která je potřebná k odstranění těchto plynů z atmosféry, je přibližně několik milionů let (Spohn et al. 2014). Oxid siřičitý byl objeven sondou „Pioneer Venus“ a následně potvrzen v průběhu pozorování sondou „Venus Express“ ve všech výškách – od povrchové oblačnosti až do termosféry. Přítomnost oxidu siřičitého v atmosféře Venuše svědčí o nedávné intenzivní sopečné činnosti.

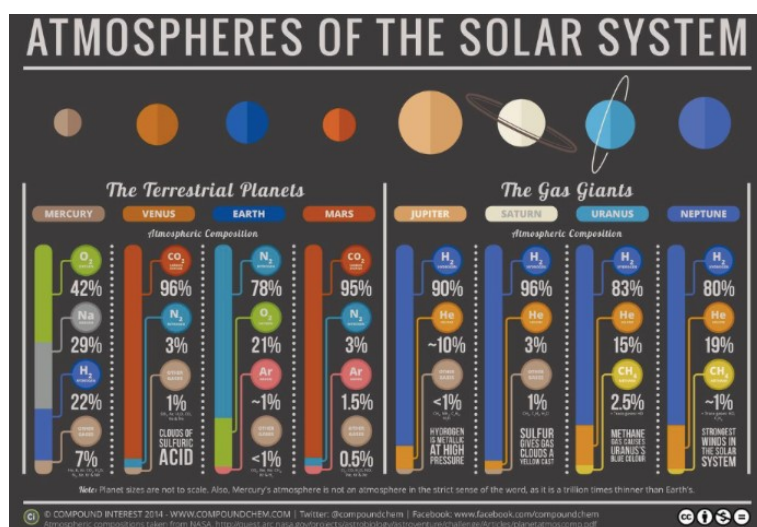
Dalším plynem, který je v atmosféře Venuše zastoupen ve zlomku procenta 0,0017 %, je oxid uhelnatý CO. Jeho zdrojem je disociace CO_2 v atmosféře slunečním UV zářením, k čemuž dochází pouze ve vyšších vrstvách atmosféry (Spohn et al. 2014). Měření, provedená sondou „Venus Express“, ukazovala na přítomnost CO i v nižších vrstvách atmosféry a také na jeho zvýšení ve směru od rovníku k pólům.

V atmosféře Venuše byly zjištěny také vodní páry v množství od 0 až do 40 ppm s průměrnou hodnotou 30 ppm (0,003 %). Současný poměr deuteria lehkého vodíku a zároveň celkové množství deuteria je na Venuši 100x větší než na Zemi, což naznačuje, že Venuše měla v minulosti větší množství vody. Měření sondou „Pioneer Venus“ objevilo přítomnost tzv. vlhké oblasti v zóně rovníku, a to odpoledne ve střední vrstvě atmosféry, kde koncentrace vodní páry může dosahovat až 100 ppm (0,01 %, Spohn et al. 2014).

Zjistit kyslík O nad oblačností planety Venuše je poměrně obtížné. Kyslík je obvykle detektován kosmickými sondami ve vyšších úrovních atmosféry při jeho uvolňování z oxidu uhličitého disociací slunečním světlem. Hydroxylový radikál OH je reaktivním druhem plynu, který byl v atmosféře Venuše zjištěn sondou „Venera Express“. Je to první a dosud vyjimečný případ vzhledem k tomu, že OH nebyl objeven u žádného jiného kosmického tělesa

kromě Země. Přítomnost OH byla objevena pomocí nočního záření ve dvou pásmech, vystředěných v 1,4 μm a 2,8 μm , s maximální koncentrací ve výšce 96 km od povrchu Venuše. Vrstva OH vykazuje vysokou časovou variabilitu jak v poloze, tak i v intenzitě (Taylor et al. 2018).

V atmosféře se stopově objevují vzácné plyny, zejména argon, helium, krypton, xenon a neon. Získávání přesnějších dat a měření izotopů lehkých a těžkých vzácných plynů by mohlo objasnit rané období historie nejen Venuše, ale i celé Sluneční soustavy. Podobnost a rozdíly v zastoupení hlavních a vzácných plynů totiž závisí na vývoji terestrických planet (obr. 11).



Obrázek 11: Porovnání chemického složení atmosfér planet Sluneční soustavy (2014). (zdroj: <http://www.planetary.org/multimedia/space-images/charts/the-atmospheres-of-the-solar-system.html>)

Venuše je považována za nejteplejší planetu Sluneční soustavy, přes to, že blíže ke Slunci je planeta Merkur. Průměrná teplota vzduchu Venuše je 462 °C (735,15 K). Tak vysoká teplota je způsobena nepropustnou atmosférou, která udržuje téměř stálou teplotu na celém povrchu planety. Přitom jen 20 % celkového slunečního záření na povrch planety dopadá a většina je odrazena hustou vrstvou oblačnosti (Spohn et al. 2014). Sluneční světlo je efektivně přeměněno na infračervené záření, které je polapeno v mracích oxidu uhličitého [16]. Měření kosmickými sondami ukázalo, že teplota atmosféry ve stejné výšce je přibližně stejná nad rovníkem i nad oblastmi pólů Venuše. Příčinou toho jevu je pravděpodobně proudění vzduchu v horních vrstvách atmosféry nebo tzv. „super rotace“ (viz kapitola 4.4). K teplotním vysokým změnám dochází s rostoucí výškou, takže teploty v horní atmosféře se pohybují od -49 °C do -173 °C.

Hustá atmosféra planety Venuše vytváří poměrně vysoký atmosférický tlak, přičemž jeho průměrná hodnota dosahuje při povrchu planety cca 92 barů, tedy 9,2 MPa. Na Zemi bychom takový tlak našli přibližně v hloubce 1 km pod povrchem oceánu. Takový atmosférický tlak při povrchu Venuše je 90x větší než na zemském povrchu. Jedná se ovšem o průměrnou hodnotu na celé planetě. Nejvyšší hodnoty atmosférického tlaku jsou pozorovány v nejnižší položených oblastech planety a s rostoucí výškou atmosférický tlak klesá (Spohn et al. 2014).

Charakteristickým rysem Venušiny atmosféry je její výrazné zabarvení, kvůli kterému má planeta výrazně šedo–bílou barvu. Z hlediska pozorování z kosmických sond planeta připomíná bílo-nažloutlou kouli. Je to tak přesto, že atmosféra je převážně složena z oxidu uhličitého a oblaka, pokrývající planetu jsou pravděpodobně z oxidu siřičitého (Taylor et al. 2018). Na řadě snímků je nápadná jasně červená barva, která vznikla umělým zesvětlením pro lepší představu povrchu planety.

Podobně jako v případě Země lze také u atmosféry Venuše rozlišit několik vrstev. Atmosféra planety Venuše se skládá ze třech základních částí, které se pak člení na jednotlivé sféry. Obecně tato atmosféra zahrnuje spodní, střední a horní atmosféru. Spodní vrstva atmosféry neboli troposféra se šíří od povrchu planety až do výšky cca 50 až 60 km nad povrchem, a to k úrovni vrcholů viditelných mraků. Ve výšce 50–65 km se nachází i tropopauza, která odděluje troposféru od dalších sfér atmosféry. Tropopauza je oblast, kde podmínky jsou nejvíce podobné podmínkám na zemském povrchu. Podle měření atmosféry sondami „Venera 4“, „Venera 14“ a také „Pioneer Venus-2“ má oblast tropopauzy v rozmezí od 52,5 do 54 km teploty mezi cca 20 °C a 37 °C. Ve výšce 49 km se atmosférický tlak Venuše vyrovnává s tlakem při hladině moře na Zemi (Pätzold et al. 2007). V tropopauze převládá vertikální pohyb tepla konvekci (Spohn et al. 2014). Teplota v troposféře Venuše ubývá s rostoucí výškou tak, že klesá o $10 \text{ K} \cdot \text{km}^{-1}$. Směrem od povrchu planety k tropopauze teplota ubývá pomaleji a směřuje se k přibližně konstantnímu stavu, což v profilu atmosféry naznačuje postupný přechod do stratosféry. Hustota troposféry Venuše je několikrát větší než zemské troposféry. Její přibližná hodnota je $67 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, což odpovídá cca 6,5 % hustoty tekuté vody na Zemi. Troposféra Venuše tvoří cca 99 % celkové hmotnosti atmosféry planety (Spohn et al. 2014).

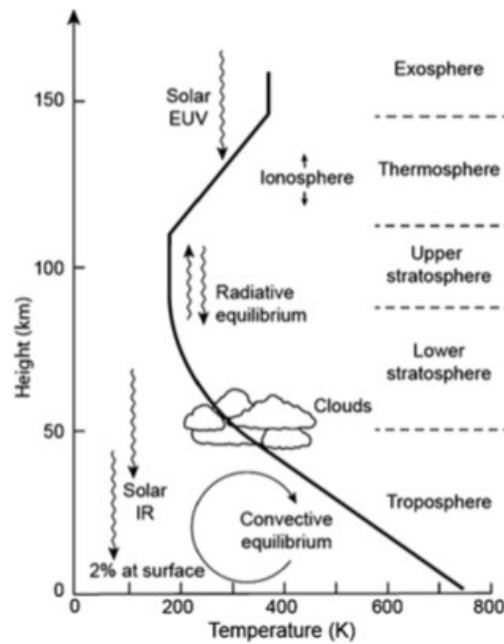
Střední vrstva atmosféry, která zahrnuje stratosféru a mezosféru, leží od tropopauzy ve výšce 65 km až do zóny minimální teploty k tzv. mezopauze ve vzdálenosti přibližně 95 km od povrchu. Ve stratosféře je teplota téměř konstantní, a to přibližně -43 °C (230 K). Stratosféra také odpovídá horní hranici oblačnosti. Na horní hranici noční strany mezosféry

se teplota vzduchu dostává na minimální hodnoty kolem $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (-173 K). Tato oblast je nazývána „kryosférou“, což je prostředí, kde se voda na Zemi vyskytuje v pevném skupenství (Taylor et al. 2018). Denní strana mezoféry ve výšce 95 km od povrchu planety má minimální denní teplotu Venuše $-108\text{ }^{\circ}\text{C}$ (165 K). V oblasti mezopauzy je teplota téměř nezávislá na výšce (Spohn et al. 2014). Hranice mezi stratosférou a mezoférou není tak výrazná, jak to je tomu u struktury atmosféry Země. Naopak rozdíly podle topografické šířky ve střední vrstvě atmosféry Venuše ukazují, že teplota polární oblasti je o $15\text{--}20\text{ K}$ vyšší než teplota oblasti rovníku (Spohn et al. 2014). Tlak v oblasti středních vrstev atmosféry Venuše je přibližně konstantní a pohybuje se mezi 100 až 1000 Pa.

Nad oblastí mezopauzy se nachází ionosféra jako přechodná oblast mezi mezoférou a termosférou. Hlavním zdrojem tepla pro termosféru je vznik iontů a elektronů dlouhovlnným UV zářením ze Slunce. Nejvíce jsou zastoupeny kladné ionty O_2^+ , O^+ a CO_2^+ . Ionty O_2^+ jsou nejvíce zastoupeny ve vrstvách s výškami 120–130 a 140–160 km. Složení horní vrstvy ionosféry ve výšce 200–250 km je odlišné. Hlavním zástupcem jsou ionty O^+ , CO_2 je disociován na CO a O a na N_2 (Spohn et al. 2014). Některé z iontů O^+ se vyskytují i noční straně planety, avšak vysoká četnost iontů je typická pro denní stranu Venuše. Horní hranice ionosféry je ionopauza, která leží ve výšce 220 až 375 km.

Horní atmosféra Venuše se skládá z termosféry a exosféry. Horní vrstvy atmosféry leží nad mezopauzou ve výšce od 100–120 km. Horní hranice exosféry dosahuje i horní hranici atmosféry ve výšce 220–350 km. V termosféře již teploty plynů nelze měřit přímo, jsou však odvozeny z hydrostatické rovnice a stupnice zastoupení různých plynů. V termosféře Venuše denní teploty dosahují pouze $76\text{ }^{\circ}\text{C}$ (350 K) přes den a $-173\text{ }^{\circ}\text{C}$ (100 K) v noci. Velké teplotní rozdíly v atmosféře Venuše se promítají do tlakových rozdílů a způsobují silné větry z denní do noční strany planety, a to zejména ve výšce cca 100 km od povrchu (obr. 12).

V atmosféře planety byl zjištěn také ozon O_3 (pomocí sondy „Venus Express“) pozorováním UV záření. Bylo zjištěno, že maximální intenzita plynů O_3 byla ve výškách mezi 90 a 120 km nad povrchem planety. Plyn O_3 tvoří několik tenkých vrstev ozonosféry o mocnosti 5 až 10 km. Koncentrace ozonu v atmosféře je tedy přibližně o 1000x menší než ve stratosféře Země. Jedná se však o reaktivní plyn, jehož koncentrace se mění podle dynamiky procesů v atmosféře planety.



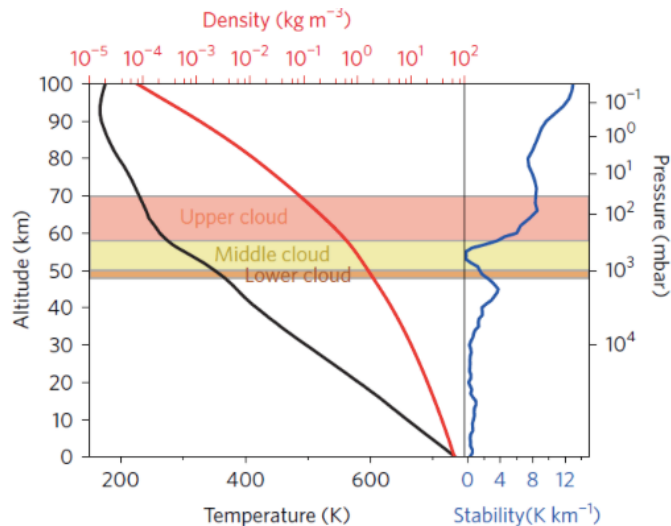
Obrázek 12: Diagram průměrného vertikálního teplotního profilu v atmosféře Venuše, zobrazující hlavní procesy a přibližné polohy oblačných vrstev atmosféry (2014). (zdroj: Taylor et al. 2018)

Současné klima na Venuši se podstatně liší od prvotního stavu atmosféry této planety (viz kapitola 4.1). Významné jsou dnes pohyby vzduchových hmot v horní atmosféře, které mají rychlost přibližně $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Tyto větry však nedosahají na povrch planety, kde se vyskytují větry s podstatně menší rychlostí. Nad povrchem planety jsou mraky z kyseliny sírové, které přinášejí silné deště. Atmosféra Venuše je hustá a velmi horká, což podstatně ztěžuje pozorování její struktury a ovšem i povrchu planety.

4.3 Oblačnost, deště a blesky na Venuši

Oblačnost je na Venuši jedním z charakteristických rysů její atmosféry. Povrch Marsu a Měsíce je možné pozorovat jak dalekohledem, tak kosmickými sondami. Naopak povrch Venuše je zakryt hustou oblačností, která odráží přibližně 75–80 % slunečního světla. Výsledkem je poměrně malá viditelnost u povrchu planety Venuše, která dosahuje maximálně 3 km.

Horní vrstva oblačnosti se nachází ve výšce cca 60–70 km na hranici troposféry a mezopauzy. Tuto vrstvu oblaků lze pozorovat dalekohledy ze Země. Horní hranice oblaků se rozšiřuje směrem vzhůru a jejich hustota se postupně snižuje jako mlha nejméně do výšky 80 km od povrchu planety.



Obrázek 13: Diagram hlavních charakteristik vrstev oblačnosti Venuše a jejich přibližné polohové rozdělení (2017). (zdroj: Lebonnois, Schubert, 2017)

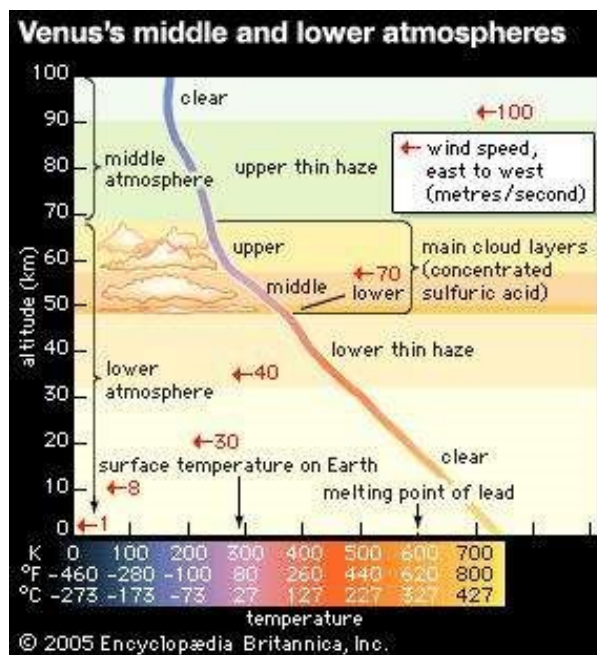
Mraky obklopující povrch Venuše jsou tvořeny oxidem siřičitým (SO_2) a kapkami kyseliny sírové (H_2SO_4). Kyselina sírová se vytváří v horních vrstvách atmosféry fotochemickým působením záření Slunce na oxid uhličitý, oxid siřičitý a vodní páru. Fotony z UV záření mohou disociovat oxid uhličitý na oxid uhelnatý a kyslík. Atomy kyslíku mohou reagovat s oxidem siřičitým, který je složkou atmosféry planety a tak přispívat ke vzniku oxidu sírového (SO_3). Reakce SO_3 s vodní párou vede k vytváření kyseliny sírové. Data získaná kosmickou sondou „Venera 9“ přispěla k vytváření modelu struktury oblačnosti na Venuši. Tento model rozděluje oblačnost do třech různých oblastí, které byly označovány jako horní, střední a nižší vrstvy oblaků (Knollenberg, Hunten 1980). Každá vrstva oblaků má specifické mikrofyzikální a strukturální vlastnosti. K tomuto rozdělení oblačnosti na Venuši později byly přidány oblasti horní a spodní vrstvy mlhoviny (obr. 13, Knollenberg, Hunten 1980).

Horní vrstva oblaků je složena z kapek H_2SO_4 , aerosolů a kontaminantů (Knollenberg, Hunten 1980). Horní vrstva oblaků se vyskytuje ve výšce přibližně 56,5–70 km s teplotou okolního prostředí $-48\text{ }^\circ\text{C}$ až $13\text{ }^\circ\text{C}$ (225–286 K). Tlak vzduchu v oblasti horních oblaků roste od cca 32 mbar do 320 mbar směrem k přechodné zóně se střední vrstvou oblaků. Průzkum atmosféry sondami spolu se spektroskopickými a polarimetrickými daty naznačují rozdělení velikostí částic do 4 kategorií (režimů), které mají odlišné poloměry, vertikální rozložení a složení částic (Spohn et al. 2014). V režimu 1 horní vrstvy oblačnosti je průměrná hustota částic $1500\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ při jejich středním poloměru částic $0,4\text{ }\mu\text{m}$. V režimu 2 je průměrná hustota částic menší, a to $50\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ se středním poloměrem částic

2,0 μm . Bylo zjištěno, že kapky H_2SO_4 patří do kapek s větší velikostí. Horní oblast oblačnosti má podle modelů nejvyšší hustotu částic a pohyby látky toky ve výšce 60 km. Optická hloubka horní vrstvy oblaků je přibližně 6.0–8.0. Optická hloubka je bezrozměrnou jednotkou, která popisuje zeslabení světla v atmosférickém prostředí procesy absorpce a rozptylu, tedy stupeň průhlednosti atmosféry. Mezi oblaky horní a střední vrstvy oblačnosti ve výšce cca 56,5 km dochází k poklesu aktivity částic, které byly pozorovány nefelometrem (Knollenberg, Hunten 1980). V přechodné oblasti s mocností cca 1 km se mění charakteristiky a vlastnosti částic, ze kterých se skládají oblaky. Kapky v horní oblasti oblačnosti jsou pravděpodobně pouze několik měsíců staré a páry H_2SO_4 mohou být přesycené. Všechny částice oblačnosti a větší část hmoty aerosolů jsou těkavé při teplotách vyšších než 200 °C (473 K).

Střední vrstva oblaků je složena primárně z kapek H_2SO_4 a dendritických krystalů sněhu. Střední vrstva oblačnosti se vyskytuje ve výšce od 50 do 56,5 km (obr. 14), kde se teplota pohybuje v rozmezí 13 °C až 77 °C (286–350 K). Tlak vzduchu stoupá směrem od přechodné oblasti k povrchu od 320 mbar do 1000 mbar. Optická hloubka střední vrstvy oblačnosti je 8–10. V režimu 1 střední vrstva oblaků má průměrnou hustotu částic $300 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ a střední poloměr částic je 0,3 μm . V režimu 2 průměrná hustota částic je $50 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ se středním poloměrem částic 2,5 μm . Režim 3 obsahuje částice se středním poloměrem kolem 7.0 μm a s jejich průměrnou hustotou $10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Střední vrstva oblačnosti ukazuje, že se celková hustota částic vrstvy postupně zvyšuje zároveň s klesající výškou. Na hranici s horní vrstvou oblaků je hustota částic $10 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a na hranici s nižší vrstvou oblačnosti klesá na $2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Ve výšce kolem 50 km se nachází hranice mezi střední a nižší vrstvou oblačnosti (Knollenberg, Hunten 1980).

Spodní vrstva oblačnosti je složena z kapek kyseliny sírové, aerosolů a dendritických krystalů sněhu. Vyskytuje se přibližně ve výškách 47,5–50,5 km, kde teplota je v rozmezí 72 °C–94 °C (345–367 K) a zvyšuje se směrem k povrchu planety. Tlak se také zvětšuje směrem k povrchu Venuše od hodnoty 1000 mbar až do cca 1500 mbar. Optická hloubka nižší oblačné vrstvy je 6–12. V režimu 1 nižší oblasti oblačnosti je přibližná hustota částic $1200 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ a střední poloměr částic 0,4 μm . Režim 2 obsahuje větší částice se středním poloměrem 2,0 μm a vytvářejí střední číselní hustotu $50 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Režim 3 obsahuje největší částice s poloměrem 8,0 μm a průměrnou hustotou částic $50 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.



Obrázek 14: Profil střední a spodní částí atmosféry Venuše s profilem oblačnosti této planety (2005). (zdroj: <https://www.britannica.com/place/Venus-planet/The-atmosphere/media/625665/47470>)

Pod spodní hranicí nižší oblačnosti dochází k postupnému zmenšování částic aerosolů až do výšky 31 km od povrchu, kde už nebyly zjištěny žádné částice (Taylor et al. 2018). V oblasti mezi výškou 46 a 31 km od povrchu se nachází tzv. *nižší oblast mlhy*, pravděpodobně složená z kapek kyseliny sírové, aerosolů a kontaminantů. Přibližná teplota nižší oblasti mlhy se pohybuje mezi 94 °C a 208 °C (367–482 K). Optická hloubka je 0.1–0.2. V nižší oblasti mlhoviny byly zjištěny pouze částice režimu 2, tedy se střední hustotou částic $20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ a poloměrem částic $0,2 \text{ } \mu\text{m}$.

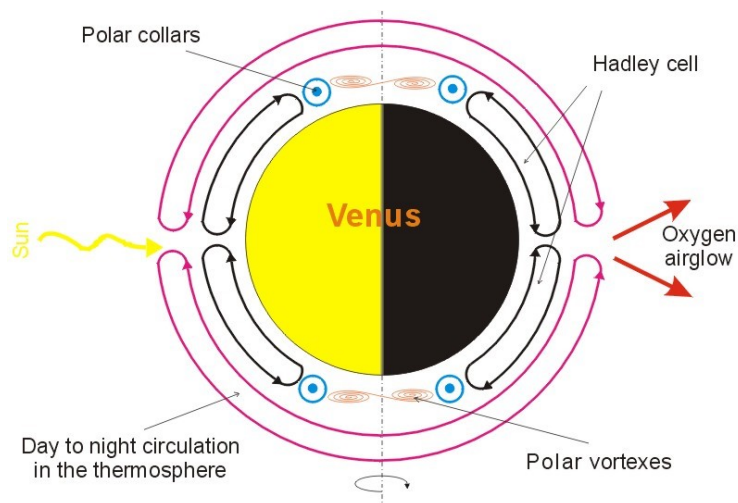
Oblačnost na planetě Venuši je bouřková. Dešťové kapky vznikající v oblacích jsou složeny z kyseliny sírové, avšak kyselý déšť z těchto mraků nedosahuje až k povrchu planety kvůli vysokým teplotám povrchu a srážky se vypařují.

Kosmickými sondami byl zjištěn na Venuši velmi zajímavý jev. Byly pozorovány elektromagnetické pulzy, které jsou interpretovány jako světelné impulzy (Spohn et al. 2014). Oblaky na Venuši jsou tedy schopné vytvářet blesky. Mise „Venera 9“ a „Venera 10“ spolu s balony „Vega 1“ a „Vega 2“ zaznamenávaly záblesky v určitém optickém rozsahu, který bleskům odpovídá. Sonda „Venus Express“ potvrdila přítomnost helikonů, které byly interpretovány jako výsledek činnosti blesků. Navíc byly objeveny „whistler waves“, tedy zvukové vlny s dobou trvání cca 100 mikrosekund (Spohn et al. 2014). „Whistler“ vlny jsou podobné signálům, které vznikají po blesku v zemské ionosféře. Frekvence vzniku

bleskové aktivity během 4 let pozorování je podobná zemským bleskům. Nepřímá pozorování blesků v atmosféře Venuše jsou vyjímečná. Blesky na Venuši jsou odlišné od těch, které jsou již pozorovány na Zemi, Jupiteru a Saturnu. Vznikají z oblaků složených z kyseliny sírové, zatímco na uvedených dalších planetách jsou původem blesků vodní mraky.

4.4 Cirkulace v atmosféře Venuše

Globální cirkulace atmosféry Venuše přibližně odpovídá cyklosferické aproximaci. Rychlost proudění vzduchu je řízena gradientem tlaku a odstředivou silou v téměř pravidelném zonálním proudění plynů. V této cirkulaci vzduchu dominují tři hlavní typy pohybu vzduchu (obr. 15). Jedná se o cirkulaci *Hadleyho buněk*, ve které převládá pomalá cirkulace vzduchu mezi nízkými a vysokými zeměpisnými šířkami v meridánálním směru, dále o zonální *super rotaci*, při níž se vzduch otáčí ve vyšších zeměpisných šířkách s vysokou rychlostí rovnoběžně s rovníkem, a *polární víry*, které mají střed nad póly planety a zabírají více než třetinu každé polokoule Venuše (Taylor et al. 2018).



Obrázek 15: Základní schéma atmosférické cirkulace Venuše (2008). (zdroj: https://en.wikipedia.org/wiki/Atmosphere_of_Venus#/media/File:Venus_circulation.jpg)

Měření kosmickými sondami „Venera“ a následně i „Venus Express“ potvrdily přítomnost slabých větrů u povrchu planety s rychlostí přibližně $0,3\text{--}2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, a to ve většině případů $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Nízká rychlost větrů pod vrstvou oblaků je podmíněna vyšší hustotou planetární atmosféry a vyšším tlakem u povrchu (Spohn et al. 2014). Až do výšky 10 km od povrchu planety zůstává rychlost větru poměrně stálá. S rostoucí výškou rychlost větrů rychle roste. Větry na Venuši mají tedy velký vertikální gradient, přibližně $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ na kilometr. Na horní hranici oblačnosti, tedy v 50–60 km, rychlost pohybu větru dosahuje

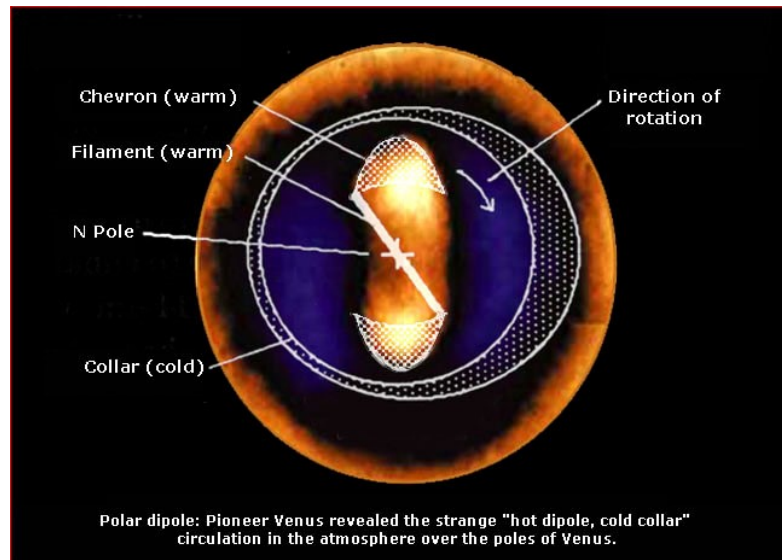
kolem $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Přímá měření rychlosti proudění vzduchu je možné na horní hranici oblačnosti Venuše. Předpokládá se, že proudění vzduchu se zpomaluje nad výškou 100 km, což je pravděpodobně způsobeno zmenšením tlaku vzduchu vyplývajícím z nerovnoměrného rozložení teplot vzduchu v různých výškách. Teploty vzduchu jsou na pólech přibližně o $20 \text{ }^\circ\text{C}$ vyšší než na rovníku (Spohn et al. 2014).

Větry na Venuši jsou retrogradní, tedy podobně jako rotace planety. Venuše se otáčí kolem své osy rotace za 243,025 pozemských dnů. U horní hranice oblaků je oběžná rychlost větru kolem planety Venuše pouze 4–5 dnů. Tento atmosférický jev je nazýván super rotace. Globální super rotace je tedy pohyb velmi husté atmosféry, který podstatně předbíhá pomalou rotaci planety (Spohn et al. 2014). Pro vznik super rotace vzdušných hmot je nutný také i malý úhel sklonu osy rotace planety k rovině její ekliptiky, aby nedocházelo k sezonnímu kolísání zahřívání povrchu planety Sluncem. Na Venuši je tlak vzduchu ve výšce, kde vzniká super rotace, cca 100 mbar. Přestože tento jev je na Venuši sledován již 30 let, mechanismy, které řídí vznik a přítomnost super rotace v atmosféře této planety, nejsou dosud uspokojivě známé. Globální model cirkulace atmosféry Venuše naznačuje, že na původ super rotace mohou mít vliv i tepelné přílivy. Předpokládá se, že tepelné přílivy energie od slunečního záření mohou roztočit atmosféru planety ve vyšších výškách. Ve výšce 60 až 70 km se nachází vrstva oblačnosti, která silně absorbuje dopadající sluneční záření, a proto pravděpodobně může roztáčet vzduchové hmoty v atmosféře do stavu super rotace. Experimenty, které byly provedeny pro pochopení mechanismu super rotace, odhalily přítomnost poledníkové cirkulace vzduchu mezi rovníkem a středními výškami, kde dominují stále super rotační větry ve směru od východu k západu. Super rotace je na Venuši diferenciální, proto na rovníku rychlost pochybu vzduchových hmot je vyšší než ve středních šířkách. Rychlost těchto větrů se s klesající výškou také snižuje na $102 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ – $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a směrem k pólům přechází od rozsáhlých polárních vírů. Bylo zjištěno, že proces super rotace není stálý (Taylor et al. 2018). Modelování ukázalo, že globální super rotace je typickou u opticky hustých atmosfér planet s pomalou rotací a že rychlost větrů je závislá na energetickém profilu atmosféry. Předpokládá se, že super rotace může být ovlivněna intenzivními konvekčními procesy probíhajícími v atmosféře planety.

Předpokládá se, že větry na Venuši jsou podmíněné konvekcí. Horký vzduch stoupá nad rovníkem, kde dochází k jeho nejsilnějšímu zahřívání slunečním zářením. Tento horký vzduch se pohybuje k pólům se střední rychlostí $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Globální cirkulační buňky (tzv. Hadleyho buňky) jsou charakterizovány rostoucím pohybem v nižších šířkách a sestupným pohybem směrem k pólům (Spohn et al. 2014). Meridionální pohyb je podstatně

pomalejší než zonální větry. Hadleyho buňka se rozkládá mezi rovníkem a 60° šířky každé polokoule a u 60° šířky ohřátý vzduch klesá a vrací se k rovníku blízko povrchu. V oblasti 60° šířky je tedy více oxidu uhelnatého. Měření sondou „Pioneer Venus“ odhalilo na Venuši změny ve směru a síle meridionálních větrů, které mohou být způsobeny topografií planety.

Mezi 60° a 70° šířky se vyskytují tzv. chladné polární límce s teplotami o 30–40 K nižšími v horních vrstvách troposféry než v sousedních šířkách (Piccioni et al. 2007). Tyto nižší teploty mohou být způsobeny stoupáním vzduchu uvnitř této oblasti a adiabatickým ochlazením, o čemž svědčí výskyt hustých a vysokých oblaků. Tato oblačnost se pohybuje ve výšce 70 až 72 km nad povrchem, což je o 5–10 km výše než horní hranice oblačnosti v jiných oblastech planety. Uvnitř chladnějších polárních límců se objevují nepravidelné pohyby, které jsou označeny jako „polární víry“. Jsou to obrovské hurikány, podobné pozemským, ale jsou nejméně čtyřikrát větší (Piccioni et al. 2007). Polární víry jsou důsledkem klesání studeného a hustého vzduchu. Na Venuši je efekt polárních vírů extrémní vzhledem k malému úhlu sklonu rotace planety a výrazné super rotaci atmosféry v rovníkové oblasti. Teplota vzduchu na horní hranici polárních límců je přibližně o 30 až 40 °C chladnější než v jiných oblastech stejné výšky (Spohn et al. 2014). Uvnitř polárních límců vzduch ve středu víru rychle klesá. Na každém pólu Venuše lze najít oblast bez silné oblačnosti, podobně jako v centru hurikánu na Zemi. Centrum polárního víru není téměř kruhové jako u většiny pozemských hurikánů, ale má protáhlý tvar (Taylor et al. 2018). Vír uvnitř polárních oblastí má na Venuši dvě maxima jasů (dvě „oči“), což jsou centra rotace na obou koncích kvaziolineárního víru propojená strukturou oblaků ve tvaru S. Takové struktury, obsahující dvojice oka nebo „dvojitě oko“, se také nazývají *polární dipóly* (obr. 16). Tyto jevy byly nejprve pozorovány u severního pólu Venuše kosmickou sondou „Pioneer Venus“ v roce 1978 a poté byly zjištěny i v oblasti jižního pólu planety sondou „Pioneer Express“ v roce 2006. Polární víry se otáčejí s periodou přibližně 2,7 dny na severní polokouli a 2,5 dne na jižní polokouli. U vnějších hranic víru je rychlost proudění 35–50 m·s⁻¹ a směrem k centru rychlost postupně klesá k nule. Teplota u horních hranic polárních vírů je přibližně -23 °C (230 K) a je vyšší než v okolním polárním límci (Piccioni et al. 2007).



Obrázek 16: Polární dipóly vírů na Venuši (2005).

(zdroj: <https://www.thunderbolts.info/tpod/2005/arch05/051207venusdipole.htm>)

Z dosavadních pozorování a měření v atmosféře vyplývá, že dynamika vzdušných hmot Venuše je řízena zejména změnami rozložení tepla a hustoty vzduchu, způsobenými rozložením slunečního záření a slapovými jevy.

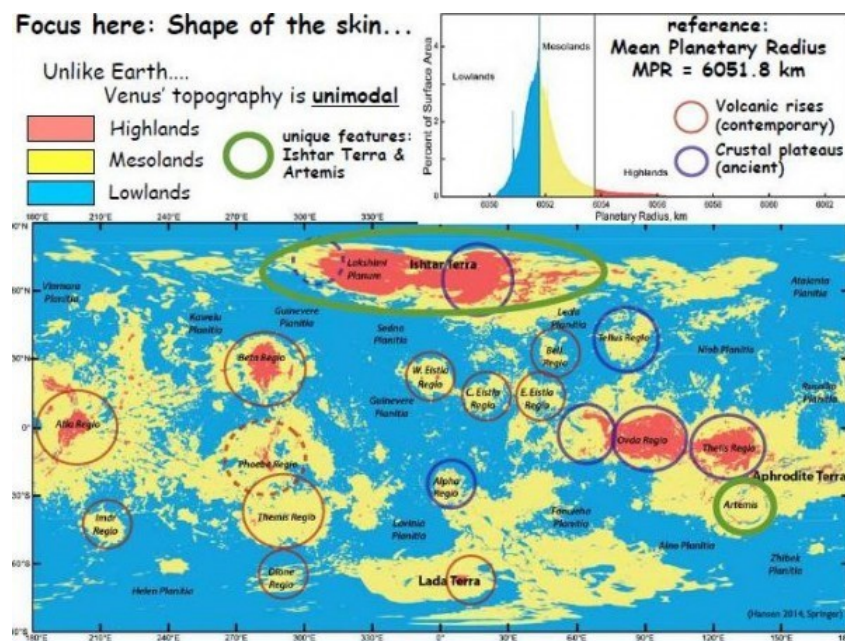
5 TOPOGRAFIE A TYPY RELIÉFU VENUŠE

5.1 Průzkum a mapování povrchu planety

Hustota atmosféry Venuše a stálá oblačnost neumožňují přímá pozorování jejího povrchu, což bylo jedním z důvodů vzniku mnoha spekulací a hypotéz, jaké jsou vlastně přírodní podmínky a povrchové tvary planety. Pokroky v kosmickém výzkumu, v tomto případě především vývoj speciálních radarů a jejich zobrazovacích systémů, tuto situaci podstatně změnily [14]. Několik misí prozkoumalo povrch Venuše (viz příloha 1) a poměrně velký objem těchto dat je přístupný jak veřejnosti, tak pro výzkumné účely. Významné údaje o topografii planety přinesly zejména americké mise „Pioneer Venus 1“ a „Pioneer Venus 2“ a sovětské mise „Venera 15“ a „Venera 16“, takže mohla být pomocí radarů sestavena mapa povrchu Venuše. Největší pokrok byl dosud v tomto ohledu uskutečněn americkou misí „Magellan“ (1990–1992), a to ve třech etapách, kdy bylo získáno 4 225 radarových snímků lepšího rozlišení ($75 \text{ m} \cdot \text{pixel}^{-1}$) pro 98 % povrchu planety. Současné mapy povrchu Venuše, které jsou k dispozici, byly sestaveny kombinací údajů získaných sondou Magellan s daty starších misí. Zabarvení na snímcích a mapách jsou žluto-oranžová (viz obrázky v 5. kapitole), což bylo způsobeno odfiltrováním modré barvy atmosféry planety. Při průzkumné misi „Magellan“ bylo provedeno snímkování některých oblastí z různých úhlů pohledu, což umožnilo vytvořit první 3D modely povrchu planety. Uvedené průzkumy reliéfu Venuše přispěly i k sestavení stereoskopických snímků, a to dosud pro cca 22 % povrchu planety.

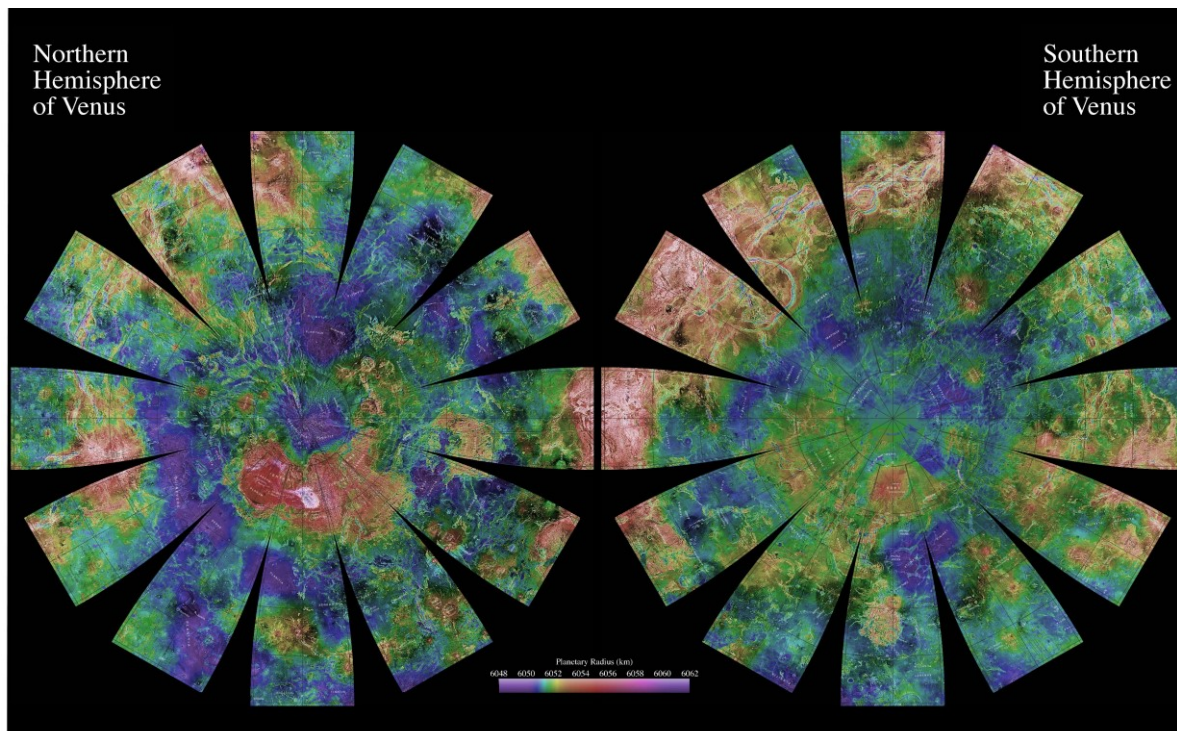
Povrch Venuše je rozdělován podle výškové členitosti na planiny, roviny a vysočiny. Kolem 80 % povrchu leží v rozsahu 1 km od hlavního planetárního poloměru, který činí 6051,881 km. Jedná se o planinné a rovinné oblasti planety (Pauer 2004). Rovník má stejný poloměr jako (téměř) sférická Venuše, obvod má 38 025 km (Redd 2012a) a jeho rovina je kolmá na osu rotace planety. Rovník rozděluje planetu na severní a jižní polokouli a na povrchu Venuše prochází severní částí Aphrodite Terra. Poledníky jsou kružnice, které procházejí póly planety a zároveň jsou kolmé k rovníku. Kartografické souřadnice na Venuši využívají jako nultý poledník kružnici, která prochází místem s velmi dobrou odezvou radarových signálů v centru oválného objektu Eve, který leží jižně od Alpha Regio. Méně než 20 % povrchu pak tvoří vysočiny u rovníku i pólů a rozsáhlé sopečné klenby. Plošné zastoupení jednotlivých tříd reliéfu je zobrazeno (v %) na diagramu na obrázku 17. Severní polokoule je charakteristická poměrně velkým výškovým rozdílem mezi oblastmi

vysočin, které zahrnují i nejvyšší místa celé planety, a planinami. Naopak na jižní polokouli Venuše jsou výškové rozdíly mezi vysočinami a planinami menší.



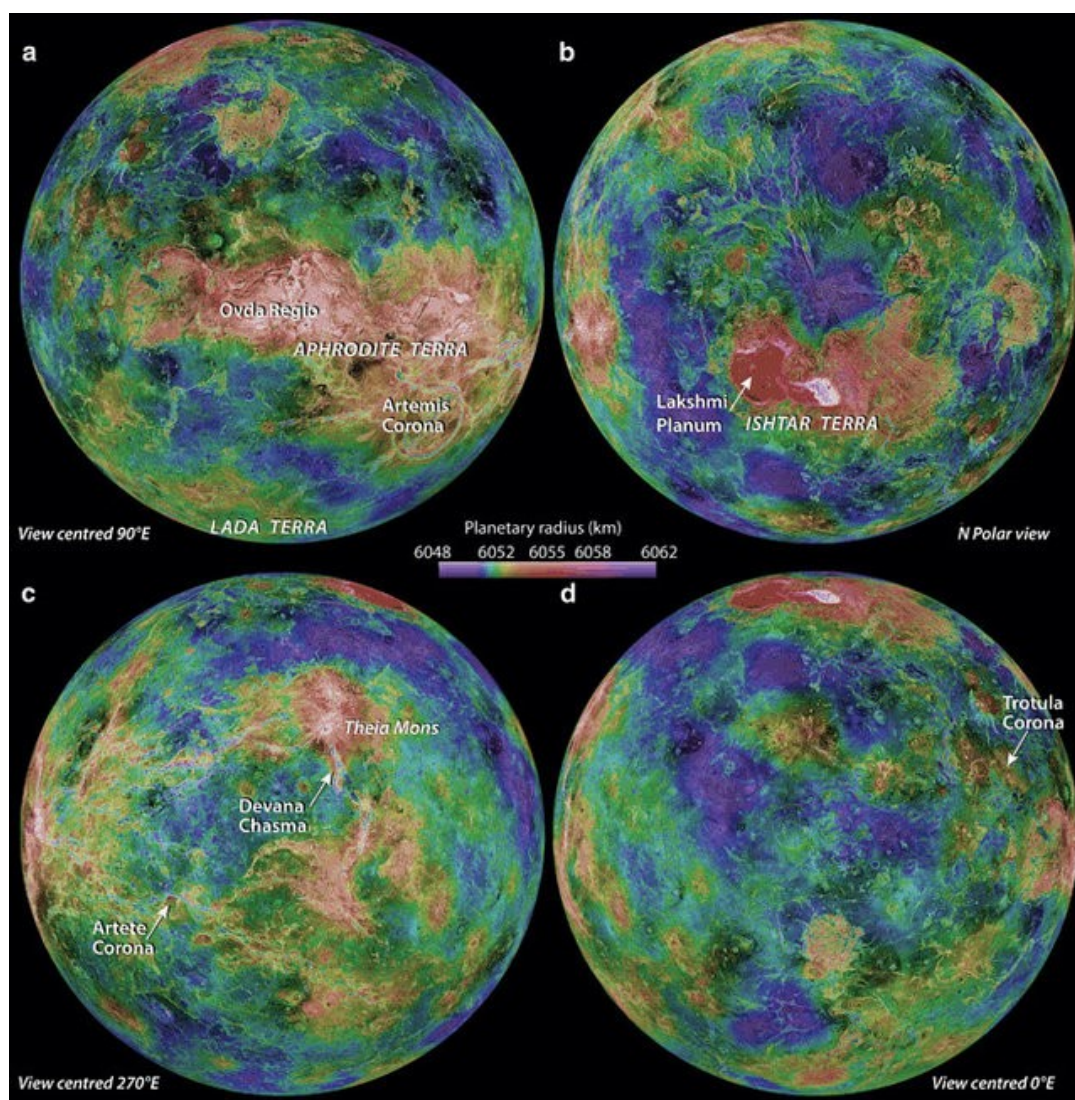
Obrázek 17: Mapa Venuše znázorňující vysočiny, roviny a planiny. Diagram ukazuje procentuální zastoupení těchto orografických typů povrchu planety (2016topograf). (zdroj: https://venus2016.files.wordpress.com/2016/04/06_hansen_lopez_venus_evolution_venus2016_public.pdf)

Topografické mapy Venuše zvyrazňují výše a níže položená místa povrchu planety (obr. 18 a 19). Nejvýše položené oblasti jsou označeny červenou barvou – jsou to planiny, vysočiny a pohoří, které obklopuje níže položený reliéf označený žlutou barvou. Zelená barva na těchto topografických mapách zvyrazňuje rozsáhlé masivy (tzv. kontinenty) Ishtar Terra a Aphrodite Terra, které vystupují z planin, označených modrou barvou. Nejvyšší pohoří (s výškami nad 2,5 km) jsou vyznačena bílou barvou, protože vykazují mnoho světlých oblastí. Voda se v kapalném stavu na povrchu Venuše nevyskytuje, takže původ světlých areálů ve vyšších výškách reliéfu stále není uspokojivě vysvětlen. Jedna z hypotéz uvádí, že původem zbarvení takových oblastí může být přítomnost mnoha částic kovových materiálů, zejména pyritu [14].



Obrázek 18: Topografická mapa severní a jižní polokoule Venuše je od 0 do 75° šířky sestavena v Merkatorově zobrazení a od 75 do 90° šířky je v azimutálním Lambertově zobrazení. Projekce sousedních segmentů se překrývají o 2° délky a některé tvary jsou zobrazeny dvakrát. Na této mapě jsou uvedeny názvy povrchových tvarů povrchů, schválené Mezinárodní astronomickou unií (2011).

(zdroj: https://astrogeology.usgs.gov/search/map/Docs/Globes/venus_globe)



Obrázek 19: Hemisférické pohledy na povrch Venuše, vytvořené pomocí radarových snímků ze sondy Magellan, a topografie povrchu, odvozená pomocí radarového výškoměru sondy Magellan. (2014). (zdroj: Harris, Bédard, 2014)

Mezinárodní astronomická unie v 70. letech 20. století rozhodla, že povrchové útvary na planetě Venuši budou pojmenovány ženskými jmény, a to jak po mytologických postavách, tak po významných historických osobnostech (Laiřr 2012). Výjimkou jsou názvy oblastí Alpha Regio, Beta Regio a Maxwell Montes, které byly identifikovány předtím (v letech 1964–1967), než vznikly první topografické mapy s dohodnutými typy a názvy povrchových útvarů. Ostatní povrchové útvary na Venuši, kterých je přes dva tisíce, mají ženská jména. Řada z těchto nomenklaturních názvů v latině je přeložena do češtiny. Příklady názvů hlavních povrchových tvarů jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1: Povrchové útvary Venuše, jejich nomenklatura a původ ženských jmen

Název útvaru	Orografický popis	Přiřazené ženské jméno
Chasma	kaňon	bohyně Měsíce; bohyně lovu
Colles	seskupení malých kopců	bohyně moře
Coronae	koróna	bohyně úrody
Crater	impaktní kráter	slavné ženy; křestní jména
Dorsum	hřeben	bohyně přírody
Farrum	palačinkové dómy	bohyně vody; vodní nymfy
Fluctus	pohyblivý terén	jiné bohyně
Fossa	brázda	bohyně války
Labyrinthus	labyrint	bohyně smrti
Linea	linie	bohyně války
Mons	hory; pohoří; sopky	bohyně mytologií; James C. Maxwell
Patera	nepravidelný kráter, kaldera	historické osobnosti
Planitia	planina	mytologické hrdinky
Planum	náhorní plošina	bohyně lásky a krásy
Regio	velká oblast vysočiny	titánky a obryně; Alpha; Beta
Rupes	rýha	bohyně domácího krbu
Terra	pevninský masív; velká vyvýšenina	bohyně lásky a plodnosti
Tessera	hřebenovitý terén	bohyně náhody, osudu a moudrosti
Tholus	kopec	jiné bohyně
Undae	oblast dun	bohyně pouště
Vallis	údolí	ženské mytologické postavy spojené s názvy řek

Vytvoření a zpřesňování topografické mapy Venuše a další systematické snímkování povrchových tvarů jsou hlavními předpoklady pro postupné poznávání petrografických

vlastností hornin a zejména pak vnitřní stavby této planety terestrického typu a jejího morfologického vývoje.

5.2 Základní orografické typy reliéfu planety

Probíhající pozorování povrchu Venuše pomocí dálkového průzkumu a postupná identifikace skupin tvarů reliéfu jsou založeny zejména na morfografických rysech rozlišených útvarů. Systematický výzkum horninového složení a morfologického vývoje těchto zjištěných orografických celků skupin povrchových tvarů je na této planetě terestrického typu v počáteční etapě.

Maximální rozdíl mezi nejnižším a nejvyšším místem povrchu Venuše je 13 km a na planetě převládají planiny, které zabírají cca 80 % povrchu. Rovinná část planety se neodchyluje od její referenční hladiny více než 1 km. Značný rozsah mají náhorní plošiny a vrchoviny, četné jsou však i riftové zóny, tektonické příkopy a údolí, vulkanické a impaktní krátery. Na Venuši není žádný oceán a za „kontinenty“ jsou označovány 3 vrchoviny, které se zvedají z rozsáhlých planin Venuše (Spohn et al. 2014). Na severní polokouli to je masiv *Ishtar Terra* (Ištarina zem), v oblasti rovníku masiv *Aphrodite Terra* (Afroditina zem) a na jižní polokouli masiv *Lada Terra*.

Povrchové tvary na Venuši jsou orograficky rozděleny do skupin, a to zejména na základě údajů získaných sondami „Pioneer Venus“ a „Magellan“ (viz kapitola 5.1): planinná oblast, rovinná oblast a vysočiny. Do každé skupiny patří několik druhů povrchových útvarů, jejichž názvy jsou v latině, mají však i překlady do češtiny. Vybrané lokality a areály níže stručně popsaných typů reliéfu Venuše jsou zobrazeny v kapitole 6 jako součásti morfostrukturního členění planety.

Oblast vysočiny na povrchu Venuše zabírá pouze 10 % rozlohy planety. Do této skupiny patří povrchové tvary, které mají výšku více než 2 km od referenční hladiny planety. K vysočinám patří: *Terra*, *Tessera*, *Planum*, *Regio* a *Mons*. *Terra* neboli pevninský masiv se vyskytuje v podobě třech velkých masivů **Aphrodite Terra**, **Ishtar Terra** a **Lada Terra**, které zabírají přibližně 7 % povrchu planety. Rozlohou nejmenší je Aphrodite Terra, která je označována za kontinent v rovníkové oblasti. Průměr tohoto masivu je cca 1000 km a dosahuje výšky až 4 km nad referenční hladinou planety. Hranice Afroditiny země jsou poměrně nejasné a odhad rozlohy tohoto masivu se pohybuje mezi 29 a 41 miliony km². Další „pevninou“ je Lada Terra, která leží poblíž jižního pólu Venuše a má poloměr cca 8615 km [17]. Odhad průměrné výšky Lada Terra je 1 km a maximálně dosahuje výšek do 3 km. Výrazná vysočina na severní polokouli Venuše je Ishtar Terra s poloměrem cca 5610 km,

rozkládá se v blízkosti severního pólu planety. Délka tohoto masivu od severu k jihu je přibližně 2500 km, od západu k východu je 8000 km a jeho rozloha se odhaduje na 8,5 milionů km². V masivu Ishtar Terra leží nejvyšší hora Venuše nazvaná Maxwell Mons (Jones, Stofan 2008). Všechny tři pevninské masivy byly pojmenované po bohyních lásky. Afrodita – řecká bohyně lásky, Ishtar – babylonská bohyně lásky, Lada – slovanská bohyně lásky.

K vysočinám patří hřbetové tvary *Tessera*, které jsou velmi členité a mají podobu reliéfní mozaiky. Tessery pokrývají cca 7,3 % povrchu Venuše, což je přibližně 33 milionů km² a vyskytují se zejména mezi 0° v. d. a 150° v. d. Radarovým snímkováním bylo zjištěno 62 hřbetů typu Tesser, přičemž největší je **Sudenitsa Tesserae** s průměrem přibližně 4200 km.

Dalším typem vysočin na Venuši je *Planum*, označovaná v českém názvosloví jako náhorní plošina. Na povrchu planety byly objeveny pouze dvě velké náhorní plošiny, a to je **Astkhik Planum** a **Laksmi Planum**. Větší z nich je Laksmi Planum, která má poloměr 2345 km a průměrnou výšku 4 km, vznikla při rozsáhlých sopečných erupcích (Dinwidie et al. 2005) a orograficky je součástí Ishtar Terra.

Typ vysočin *Regio* jsou rozsáhlé oblasti povrchu Venuše, které jsou u pozorování s okolními oblastmi podstatně světlejší. V období radarových pozorování byly při průzkumu Venuše objeveny nejdříve. Mezi největší z nich patří **Eistla Regio** s poloměrem cca 8015 km, která leží v rovníkové oblasti planety. Je většinou tvořena lávovými proudy, které se rozlévaly na stovky kilometrů od center sopek. Dosud bylo objeveno 22 vysočin typu Regio.

Významnou skupinou vysočin jsou útvary typu *Mons*. Jedná se o hory, horská pásma, štítové sopky a větší klenby reliéfu Venuše. Celkově bylo zatím objeveno 102 útvarů tohoto typu vysočin. Na Venuši se vyskytují 4 hlavní pohoří, která jsou součástí pevninského masivu Ishtar Terra. Nejvyšším pohořím na Venuši je **Maxwell Mons** v Ishtar Terra, které se zvedá až 10 km nad okolními planinami (Dinwidie et al. 2005).

Orografickými celky rovin jsou *Tholus*, *Farrum*, *Undae*, *Colles*, *Coronae*, *Dorsum*, *Fluctus* a *Labyrinthus*. Tyto rovinné tvary Venuše jsou ve výškách cca 0–2 km od referenční hladiny planety a zabírají přibližně 51 % jejího povrchu. *Tholus* (vrchy) jsou malé klenbové hory nebo kopce. Dosud bylo rozlišeno více než 40 vrchů, z nichž největší je **Toci Tholus** o průměru 300 km. Podobným tvarem je *Farrum*, který má plošší vrchol a strmější svahy. Dalšími názvy pro *Farrum* jsou „pancake dome“ nebo „lava dome“, v češtině jsou občas označovány jako „palačinkové domy“. Z 9 dosud známých útvarů tohoto typu je největším **Seoritsu Farra** s průměrem 230 km.

Výraznými útvary, které byly objeveny na rovinách planety, jsou *Undae* neboli duny. Na Venuši je málo objevených eolických akumulčních tvarů, a to jak pro nedostatek částic písku, tak pro limity rozlišení na snímcích (Lorenz 2015). Na planetě jsou dosud známé tři velké duny, z nichž nejvíce výrazná je **Menat Dunae**. Nachází se v regionu dun Algaonice, který má rozlohu přibližně 1300 km². Nejseverněji leží oblasti dun Fortuna – Meshkenet, reliéfní celky mezi Ishtar Terra a Meshkenet Tessera. V této oblasti se vyskytuje také příčná duna **Al – Uzza** s poloměrem 150 km². Největší známou dunou na Venuši je **Ningal Dunae** s průměrem 225 km.

V územích rovin jsou odlišeny také *Colles* (kopce), které na radarových snímcích mají zaoblený tvar. Větší kopce jsou zaraženy do skupiny *Tholus* a největší – do skupiny tvarů *Mons* (Spohn et al. 2014). Celkově těchto útvarů typu Colles bylo na Venuši objeveno zatím 16, z nichž největší je **Akkruva Colles** o průměru 1059 km.

Tvary *Dorsum* jsou nízké a zvlněné hřebeny s délkami až do několika set kilometrů. Jedná se pravděpodobně o hřbety, které vznikly při ochlazení a nakupení čedičových láv kolem sopečných kráterů. Na dostupných snímcích a mapách planety Venuše mají podobu protáhlých pásem, které připomínají žíly. Hřebenů tohoto typu bylo dosud identifikováno 100, z nichž největší je **Unelanuhi Dorsa** na severní polokouli o průměru 2600 km.

Velmi členitý terén, který vznikl z mohutných proudů, je nazýván *Fluctus*. Celkově oblastí tohoto typu rovinného reliéfu je na Venuši 50. Největší z nich je **Vut-Ami Fluctus** s průměrem 1300 km, ležící na jižní polokouli planety. *Labyrinthus* (labyrinty) jsou oblasti Venuše s poměrně rovným povrchem, avšak rozčleněné systémem údolí a kaňonů (*Vallis* a *Chasma*). Pravděpodobně byl dosud identifikován pouze **Radonitsa Labyrinthus** s poloměrem 100 km.

Velmi významnou skupinou povrchových tvarů planety jsou *Coronae* (koróny). Jedná se o oválné detaily povrchu v podobě věnce. Koróny jsou charakterizovány jako velké kruhové útvary obklopené soustředěnými hřebeny a zlomy (Spohn, Breuer, Johnson 2014). Koróny byly objeveny nejen na Venuši, ale např. také na Uranově měsíci Miranda. Celkově bylo na Venuši zjištěno více než 500 korón, z nichž největší je **Artemis Coronae** o průměru 2600 km [17]. Koróna Artemis se nachází v oblasti pevninského masivu Aphrodite Terra. Zajímavé je, že Artemis nevystupuje nad okolní reliéf jako ostatní koróny, ale naopak je centrum koróny položeno o 4 km níže než okolí. Rozdíl mezi nejvyšším a nejnižším bodem koróny Artemis je cca 7,5 km. Koróny mají na Venuši v centrálních částech často sopky, obklopené rozsáhlými lávovými proudy různých směrů. Často je centrum koróny umístěno níže než okolní hřebeny, ale zároveň výše než okolní roviny. Většina korón je umístěna

podél riftových nebo kaňonových systémů (*Chasma*), občas se vyskytují i na vysočinách a rovinách. Koróny pravděpodobně byly vytvořeny výstupy částečně roztaveného magmatu, které se nachází pod tvrdou vrstvou kůry planety.

Reliéf planin zahrnuje na Venuši oblasti, které jsou blízké referenční hladině planety. Mezi hlavními celky planin jsou na této planetě *Chasma*, *Fossa*, *Linea*, *Patera*, *Planitia*, *Rupes* a *Vallis*. Tyto útvary mají velmi rozmanitou topografii a pravděpodobně také morfologický vývoj. *Chasma* (kaňon) je oblast extenzní deformace a je popisován jako systém zlomů v podobě hlubokých kaňonů. Dosud bylo zjištěno 59 kaňonů, z nichž pět má délku tisíce km a jsou několik km hluboké. Zlomové zóny jsou až 200 km široké a členěné na užší kaňony šířkami cca 50 až 80 km. Většina z kaňonů *Chasma* je vytvořena blízko korón. *Chasma* mohou být morfograficky porovnány s pozemskými riftovými zónami. Největším kaňonem tohoto typu je **Parga Chasma**, jehož průměr je 10 000 km, hloubka 0,5–2 km a šířka 20–100 km. Na topografické mapě planety Venuše mají *Chasma* často výrazně světlou barvou, což může naznačovat vyšší polohu nebo přítomnost většího množství pyritu.

Dalším typem planinného reliéfu na Venuši je *Fossa* (kanál, brázda). Jedná se o dlouhé, úzké, mělké kanály, jejichž dno je hladké nebo mírné zvlněné. Na Venuši bylo dosud objeveno 31 objektů typu *Fossa*. Největšími jsou tři kanály o průměru kolem 1800 km – na severní polokouli kanál **Karram**, na jižní polokouli kanály **Khosedem** a **Brynhild**.

Útvary typu *Fossa* jsou podobné liniové tvary *Linea*. Systémy paralelních linií jsou zlomového původu, přičemž na Venuši bylo zatím identifikováno 17 objektů typu *Linea*. Největší z nich je **Morrigan Linea** na jižní polokouli, a to s průměrem 3200 km [17].

Velmi nápadné jsou útvary *Rupes*, tedy zlomy (příkopy). Jedná se o sítě poměrně úzkých zlomových zón. Tyto příkopy pravděpodobně vznikly desintegrací těles lávových proudů a následných rozsáhlých sesuvů [18]. Ze sedmi dosud známých útvarů tohoto typu reliéfu je největší **Vaidilute Rupes** s poloměrem 2000 km.

Nepravidelné sopečné krátery se nazývají *Patera*, mají členité okraje až kalderu. Předpokládá se, že *Patera* vznikají propadnutím elevací magmatu, což vytvoří depresi. Na Venuši je potvrzeno 66 *Pater*, z nichž největší je **Sacajawea Patera** s poloměrem 233 km.

Vallis neboli údolí jsou zvlněná údolí nebo lávové kanály. Příčiny vzniku velkých kanálů typu *Vallis* nejsou uspokojivě vysvětleny. Podle snímkování misí „Magellan“ bylo zjištěno na Venuši cca 200 lávových kanálů, které jsou děleny na obyčejné, větvičí a stratokomplexy (Oshigami, Namiki 2007). Nejdelším kanálem je obyčejný kanál **Baltis**

Vallis. Představuje dlouhý lávový kanál s délkou až 7000 km bez významných rozvětvení. Rozvětvené kanály mají pestrou liniovou strukturu a stratokomplexy představují kombinace obyčejných a větvičích se kanálů. Velikosti kanálů a jejich sítí jsou desítky metrů šířky a až několik set km délky. Proudění vyvřelého materiálu na takové vzdálenosti je umožněno jeho vysokou teplotou, nízkou viskozitou a vysokou teplotou atmosféry, což vše velmi zpomaluje proces tuhnutí lávy.

Plošně nejvíce rozšířeným útvarem povrchu Venuše jsou planinné oblasti *Planitia* (planina). Jedná se o snížené oblasti vzhledem k okolnímu reliéfu a jsou interpretovány jako území proudů čedičových láv. Planiny (Planitia) zabírají téměř 85 % povrchu Venuše, přičemž nejmenší z nich mají v průměru pouze 1200 km, zatímco největší planina má průměr 7520 km. Jedná se o **Guinevera Planitia**, která zaujímá velkou část severní polokoule planety. V oblasti Guinevera Planitia byly pozorovány indicie sopečné činnosti, při níž vznikly štítové sopky, ztuhlé lávové proudy a sopečné dómy.

Povrch Venuše zahrnuje také poměrně specifické typy reliéfu. Velkorozměrné struktury *arachnoid* z řeckého „podobné pavoukům“. Jsou pravděpodobně vulkanického původu, mají středovou kruhovou prohlubeň (dóm) obklopenou zvýšeným okrajem s členitými hřbety a údolími (Dinwidie et al. 2005). Velikostí arachnoidy jsou v průměru 100–200 km a většina z nich je na severní polokouli planety na planinách. Geneticky jsou podobné arachnoidy korónám, jsou však menší a mají síť bílých příčných proužků pravděpodobně zlomového původu (Mašata 2012). Arachnoidy byly objeveny sondami „Venera 15“ a „Venera 16“ v roce 1983 a do současnosti bylo na Venuši identifikováno 256 arachnoidů.

Na povrchu Venuše byly zjištěny *impaktní krátery*, jejichž četnost je řádově menší než na Marsu nebo na Měsíci. Celkově dosud bylo na povrchu Venuše identifikováno 940 impaktních kráterů, jejichž průměr se pohybuje od 1,5 km až k 268,7 km (Dinwidie et al. 2005). Předpokládá se, že hluboké a starší impaktní krátery byly vyplněny a překryty v období intenzivní sopečné činnosti před 500–600 miliony let. Dalším důvodem pro nižší počet impaktních kráterů na Venuši je existence husté atmosféry, v níž menší impakty zanikají před dopadem. Největším impaktním kráterem na Venuši je Mead s poloměrem 270 km (Dinwidie et al. 2005), který má dva nápadné valy o výšce kolem 1 km. Dno tohoto kráteru je vyplněno sopečnou lávou, která byla impaktem uvolněna z podpovrchového prostoru planety. Pouze necelých 20 % zachovaných impaktních kráterů na Venuši je tvarově podstatně ovlivněno mladší sopečnou činností.

6 MORFOSTRUKTURNÍ TVARY POVRCHU VENUŠE

6.1 Morfografie planety a typy morfogenetických procesů

Povrchové tvary Venuše umožňují do určité míry charakterizovat důsledky působení endogenních procesů, které závisí na dosud málo známých fyzikálních a chemických vlastnostech látky a vnitřní stavby planety. S těmito otázkami souvisí i snaha o vysvětlení původu retrogradní rotace Venuše, jejího slabého magnetického pole a identifikace hlavních etap dlouhodobého vývoje kůry a povrchu planety. Slabé magnetické pole Venuše umožňuje efektivní působení slunečního větru v atmosféře i na povrchu této planety. Atmosféra Venuše je nejvíce prozkoumanou částí planety, včetně hlavních rysů cirkulace vzdušných hmot. Očekávají se pokroky v objasnění vzniku super rotace a dynamiky polárních vírů. Získání dalších údajů o izotopech vzácných plynů v atmosféře Venuše přispěje také k vytvoření komplexní hypotézy o průběhu vývoje terestrických planet.

Morfograficky rozlišené horninové masivy, dosud zjištěné na současném povrchu Venuše, jsou rozdělovány do tří orografických skupin (Koronovskiy 2004). Nejstarší orografická skupina se skládá z oblastí Tesser, Mons, Dorsum a Planitia, na kterých vznikly také arachnoidy. Další orografická skupina je tvořena rozsáhlými náhorními plošinami (Planum) a planinami (Planitia). Nejmladší orografická skupina zahrnuje planiny, včetně Chasma, Fossa, Linea a Vallis. Na planinách a plošinách se vyskytují činné sopky, koróny, kaldery a zachované impaktní krátery. Horninové složení nejstarší skupiny orografických celků je v podstatě dosud neznámé. Většina orografických útvarů je pravděpodobně složena z čedičové lávy, která může být podobná oceánské kůře na Zemi.

Morfostrukturní rysy a připovrchová tektonická stavba Venuše jsou velmi pestré a historie jejich vývoje není ještě v současné době uspokojivě známá. Je však velmi pravděpodobné, že na Venuši není vyvinuta astenosféra a nebyly zjištěny ani morfostrukturní projevy deskové tektoniky (Kuzmenkov 2018). Zásadní význam při vytváření současného povrchu Venuše měly vulkanické procesy, vznik tektonicky podmíněných zlomových systémů (včetně projevů silné seismické aktivity) a epeirogenetické pohyby převážně vertikálních směrů, tedy výzdvihy a poklesy rozsáhlých oblastí (Dinwidie et al. 2005; Spon et al. 2014).

Současný povrch planety Venuše je poměrně nedávného stáří. Předpokládá se, že reliéf Venuše byl globálně přetvořen před cca 600 miliony let, a to převážně intenzivními vulkanickými procesy a doprovodnými jevy [17]. Geologický vývoj planety zahrnuje tři hlavní etapy, nazvané Fortunian, Guineverian a Atlian (obr. 20). Nejstarší období

„Fortunian“ (před 540 až 530 miliony let) je charakterizováno intenzivními tektonickými procesy a následně vznikem stavby oblastí se silnější kůrou, kde vznikaly tektonicky rozčleněné a topograficky pestré náhorní plošiny Tesserae. V dalším geologickém období Guineverian (před 500 až 300 miliony let) pokračovaly intenzivní tektonické procesy, vznikaly členité morfostrukturní plošiny, horská pásma, údolní síť na zlomových systémech a také nejstarší koróny (Ivanov, Head 2013). V mladší části tohoto období vzniklo mnoho štítových sopek, poté došlo k mohutným výlevům láv, které postupně vyplňovaly již vzniklé planiny a zakryly podstatné části povrchu planety lávovými plošinami.

Nejmladší etapou geologického vývoje planety Venuše je Atlianské období (před 250 miliony let až do současnosti), které je charakterizováno vznikem rozsáhlých kaňonovitých údolí a lávových proudů. Velmi často jsou tyto povrchové tvary spojeny s areály vzniku štítových sopek a korón (Tailor et al. 2010). Je pravděpodobné, že atlianský vulkanismus pokračuje i v současné době. Bylo odhadnuto, že přibližně 70 % povrchu Venuše bylo radikálně změněno v průběhu guineverianského období a pouze 16 % v období Atlian.

Geologic time units	Guineverian Period		Atlian Period									
Time-stratigraphic units	Guineverian System		Atlian System									
Rock-Stratigraphic units	Fortuna Formation (t)	Atropos Formation (pd)	Lavinia Group		Agrona Formation (gb)	Acrova Formation (psa)	Rusalka Group		Boala Formation (sc)	Atla Group		Aurelia Formation (dark parabola)
Regime	?		TECTONICALLY DOMINATED			VOLCANICALLY DOMINATED			VOLCANO-TECTONIC			
Regional topography	?		PLATEAU-LIKE HIGHS AND REGIONAL LOWLANDS (BASINS) FORMED			VOLCANIC FILLING OF BASINS			RIFTED RISES FORMED			
			Lavinia Formation (pr)	Akna Formation (mb)			Rusalka Formation (rp1)	Ituana Formation (rp2)		Gunda Formation (ps)	Bell Formation (p)	Devana Formation (rz)

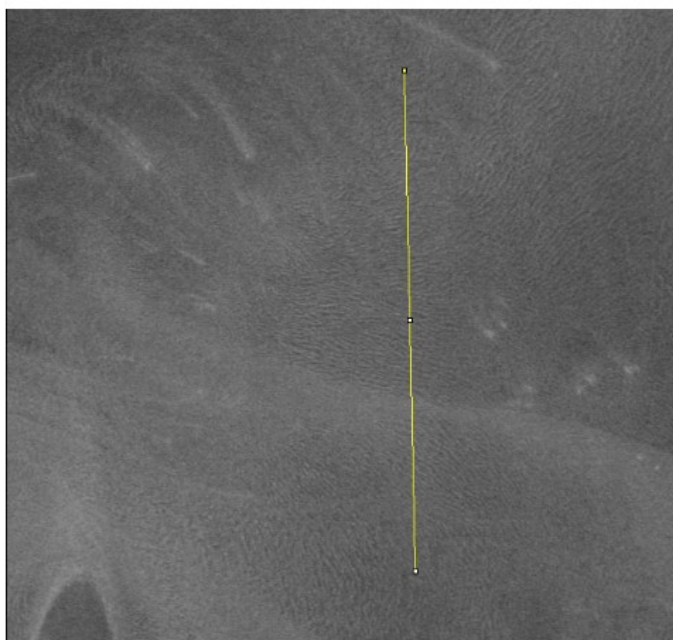
Obrázek 20: Schéma hlavních tektonických režimů vytváření povrchu Venuše.

(zdroj: Ivanov, Head 2013: globální tektonický režim, globální vulkanický režim a režim riftového vulkanismu)

V 5. kapitole bylo ukázáno, že při vytváření základních topografických map Venuše byl zobrazen téměř celý povrch planety. V současné době je identifikováno několik orografických skupin reliéfu Venuše (s více než 2000 názvy jednotlivých útvarů)

a jsou publikovány jejich radarové snímky nebo digitální modely. Z této zásadní grafické dokumentace vyplývá (srov. kap. 6. 2), že povrchové tvary Venuše jsou primárně vulkanického původu. Povrch Venuše je výrazně rozčleněn zlomovou tektonikou, intenzivním zvětráváním hornin (které jsou pravděpodobně převážně čedičového typu), rozsáhlou erozí a/nebo zakrytím staršího reliéfu mladšími lávovými proudy a také působením eolických procesů. Specifickou skupinou morfostrukturních tvarů jsou četné výskyty impaktních kráterů.

Současné povrchové tvary Venuše jsou tedy polygenetického původu a jejich regionální konfigurace svědčí o průběhu vývoje povrchové části kůry planety. Rozsah uvedených typů eroze umožňuje do určité míry identifikovat relativní stáří hlavních orografických celků na Venuši od období před přibližně 500–300 miliony let do současnosti (Oshigami, Namiki 2007). Podrobnějších údajů o charakteru vulkanických hornin a morfogenetických procesech je však dosud velmi málo. Například na radarových snímcích povrchu Venuše byly ve vyšších polohách zjištěny světlé oblasti, jejichž zabarvení je vysvětlováno obsahem pyritu v hornině. Působení eolických procesů, tedy erozní a akumulární činnosti větru, je spolehlivě prokázáno nápadnými rovnoběžnými eolickými rýhami a rozsáhlými dunami zejména v oblasti Al-Uzza Undae (obr. 21). Rychlost větru v husté atmosféře je na kontaktu s povrchem Venuše odhadována na pouhých cca $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.



Obrázek 21: Rozsáhlá duna o šířce přibližně 36 km a s výškami od 15 do 95 m. Nápadné pruhy vznikají silným prouděním vzduchu v oblasti Al-Uzza Undae. Žlutá linie byla použita pro sestavení radaro–klinometrického profilu a pro určení výšky duny nad okolním reliéfem Venuše. (zdroj: Lorenz, 2015)

Další zásadní otázkou výzkumu vývoje povrchových tvarů Venuše je charakter fyzikálního a chemického zvětrávání na této planetě. Již průzkumná sonda „Venera 8“ identifikovala horniny s vysokým obsahem radioaktivních prvků. Vysoký tlak vzduchu a teplota na povrchu planety, přítomnost řady radioaktivních prvků v atmosféře a jejich pravděpodobný výskyt v horninách jsou základem pro hypotézu o specifických procesech zvětrávání. Při vysoké teplotě povrchu planety, která je blízká teplotě tavení zinku, probíhají pravděpodobně četné interakce mezi horninami (např. s CaCO_3 a SiO_2) a atmosférickými plyny (s CO_2 , vodní párou apod.).

V roce 2012 byly publikovány pravděpodobné indicie pokračování vulkanické činnosti na Venuši. Jedná se o zjištění podstatného zvýšení výskytu oxidu siřičitého v horních vrstvách atmosféry v letech 2006–2007 [19]. Pozorováním kamerou VMC (Venus Monitoring Camera) byly nalezeny nejméně čtyři horké skvrny s denními změnami teploty, a to v oblastech s morfoloicky prokázanou dlouhodobou tektonickou aktivitou.

6.2 Morfostrukturní členění povrchových tvarů Venuše

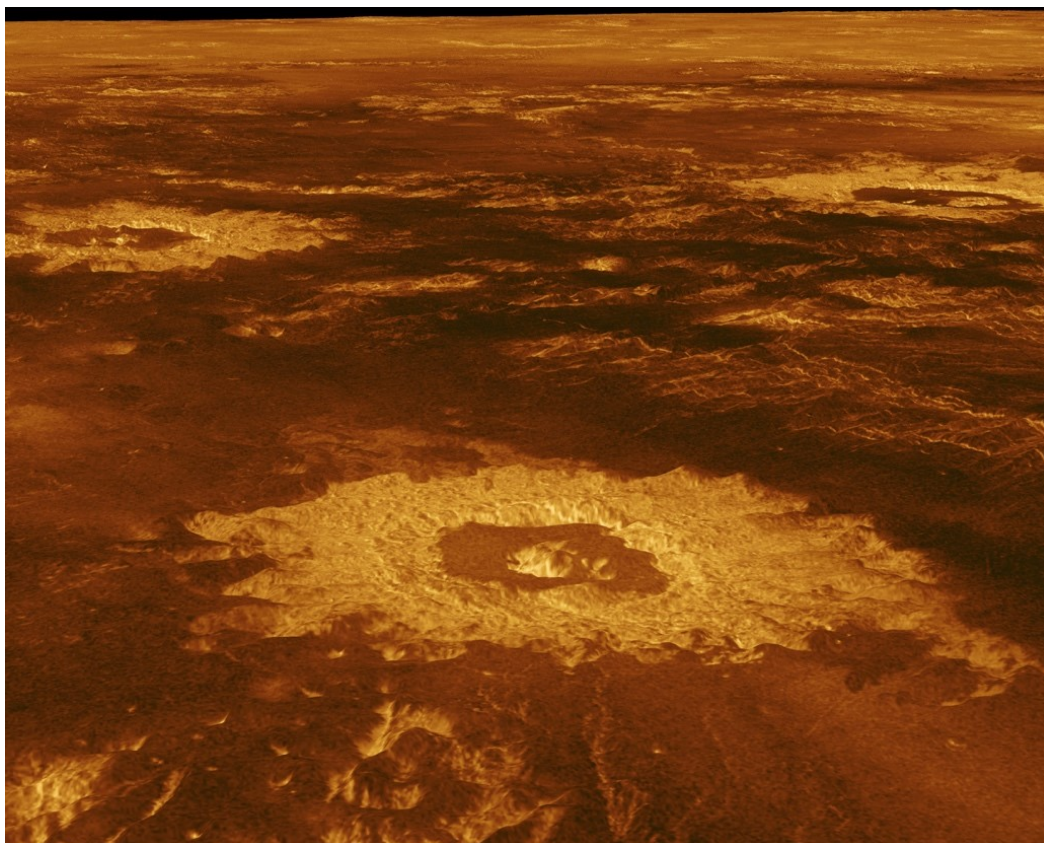
Porovnání topografických údajů s morfografickými poznatky odvozenými převážně z radarových snímků povrchu Venuše ukazuje, že většina povrchových tvarů planety je vulkanického původu. Současný reliéf Venuše a jeho orografické uspořádání mají tedy převážně morfostrukturní charakter a jsou významným svědectvím o reliktech hlavních etap vývoje připovrchové části pevné kůry planety.

Morfostrukturní členění povrchových tvarů Venuše je založeno na převládajícím názoru (Rajkumov 2014), že pevnou kůru planety tvoří v podstatě souvislá litosférická deska. Výskyt určitého typu morfostrukturních tvarů je pak dokladem dávného i současného působení endogenních sil na změny jejího povrchu. Kvalita grafické dokumentace povrchu planety Venuše již umožňuje propojení hlavních topografických útvarů (různého plošného rozsahu a členitosti, viz 5. kapitola) s typem morfoloických celků a sledem událostí, při nichž vznikaly. Uvedený historicko-genetický význam mají zejména tyto hlavní skupiny morfostrukturních tvarů: Planitia, Terra, zóny tektonických zlomů, vulkanická tělesa, Fluctus a impaktní krátery.

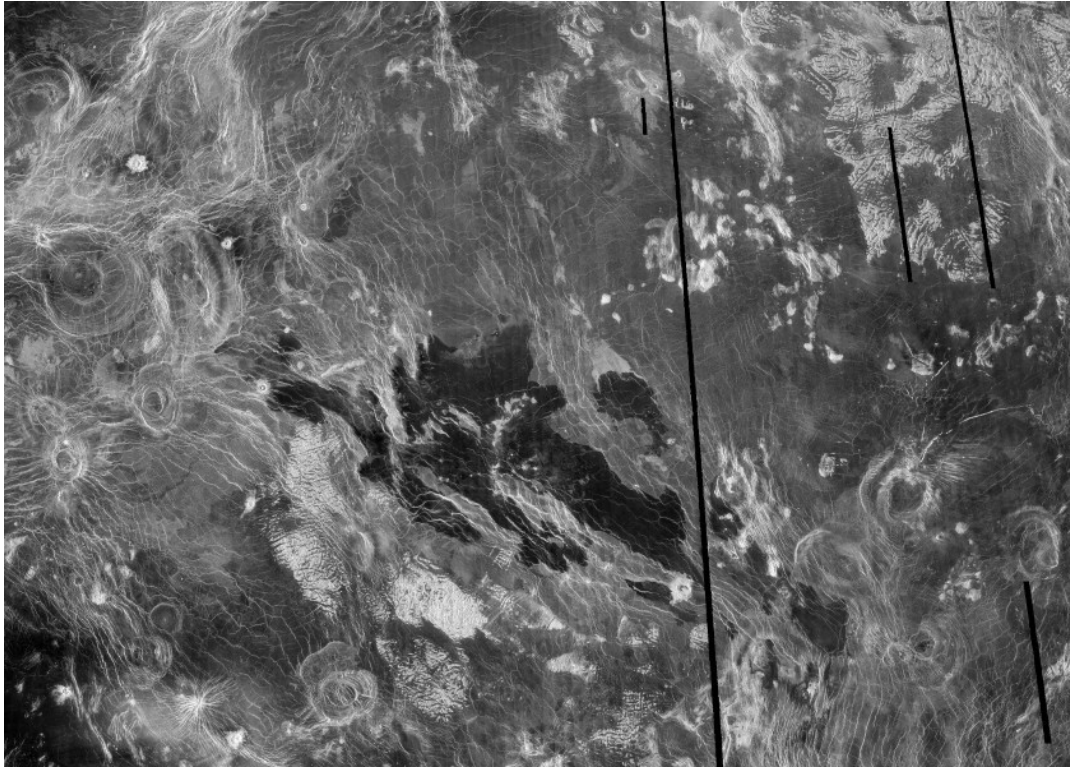
Planitia.

Nejstaršími a nejrozsáhlejšími morfoloickými celky na povrchu Venuše jsou Planitia. Planiny jsou morfostrukturním útvarem vulkanického původu, které vznikaly během Guineverianu, tedy v období dlouhodobého aktivního vulkanismu na této planetě.

Na jejich povrchu byl zjištěn velký počet štítových sopek, u kterých docházelo k erupcím a výlevům obrovského množství lávového materiálu. Planitia jsou tedy velkoplošné morfostrukturní celky, které zahrnují i další typy povrchových tvarů menšího rozsahu (obr. 23). Typickou planinou je Lavinia Planitia, která je součástí Alpha Regia a jsou na ní zachovány tři nápadné impaktní krátery (obr. 22).



*Obrázek 22: Tři rozsáhlé impaktní krátery v oblasti Lavinia Planitia (3D model, 1996).
(zdroj: <https://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=PIA00103>)*

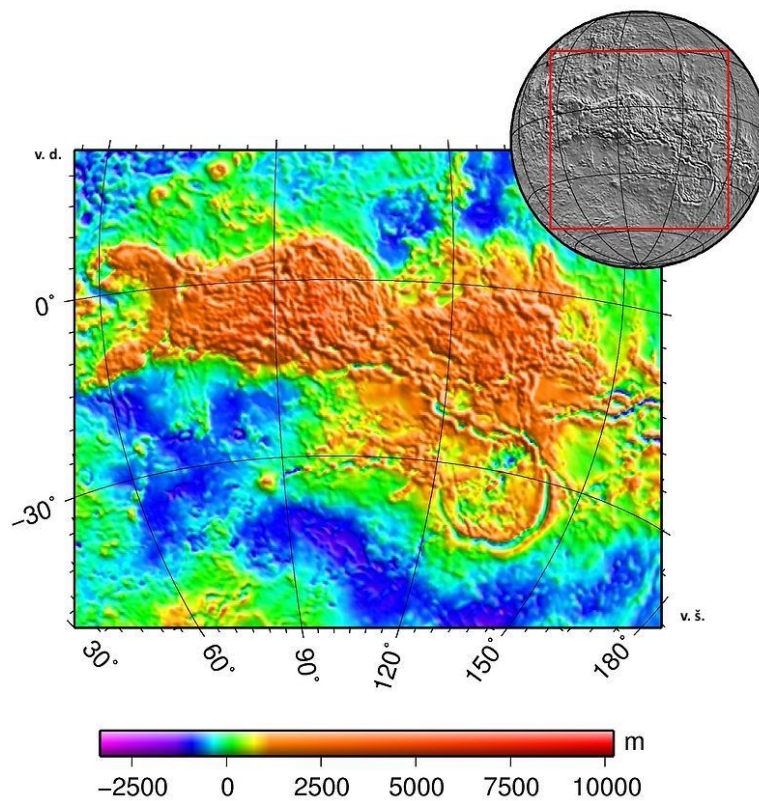


Obrázek 23: Polygenetický reliéf oblasti Bereghinia Planitia s pestrým komplexem povrchových tvarů vulkanického původu. Ve středu snímku je nápadný lávový proud rozčleněný povrchovou sítí zlomů (1991).

(zdroj: <http://www.planetary.org/multimedia/space-images/venus/bereghinia-planitia-venus.html>)

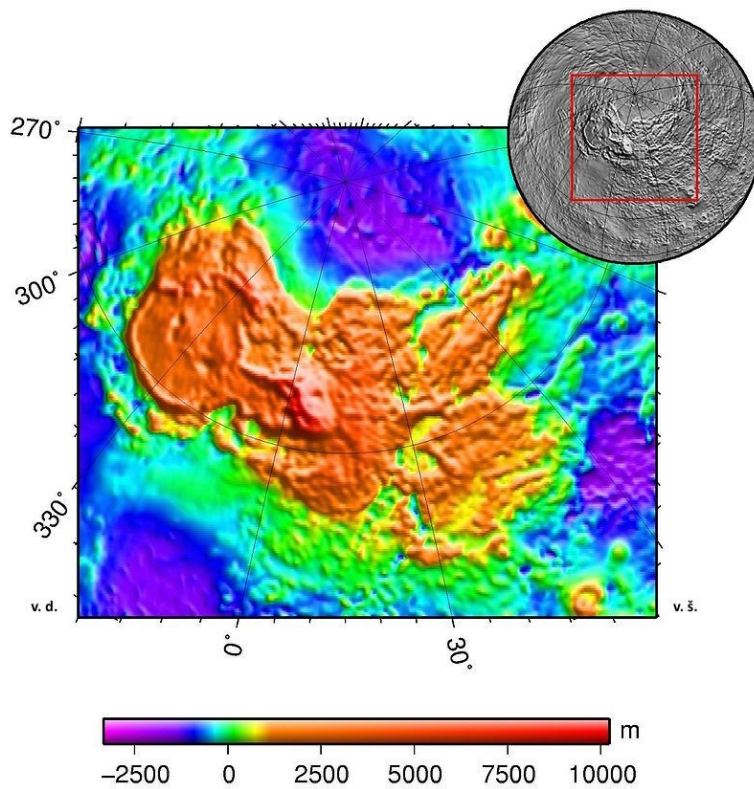
Terra.

Mohutné vysočiny, označované jako pevninské masivy (Terae), náleží pravděpodobně k nejstarším zachovaným oblastem povrchu Venuše. Největší z nich jsou Ishtar Terra a Aphrodite Terra (obr. 24 a 25). Tyto pevninské masivy vznikly ve fortunianské fázi na začátku fanerozoika, tedy před cca 540 miliony let (Ivanov, Head 2013), a to při rozsáhlém přetváření a deformaci kůry planety. Pod oblastmi pevninských masivů vznikla silnější kůra, a to s mocností 25–50 km. Jejich okraje i centrální části jsou v důsledku působení tektonických sil převážně kompresního charakteru vymezeny a rozčleněny zlomovými zónami (obr. 26 a 27). V oblastech masivů Terae vznikla podél sítí zlomových zón vulkanická pohoří, z nichž nejvýznamnější jsou hřebeny typu Tessera.



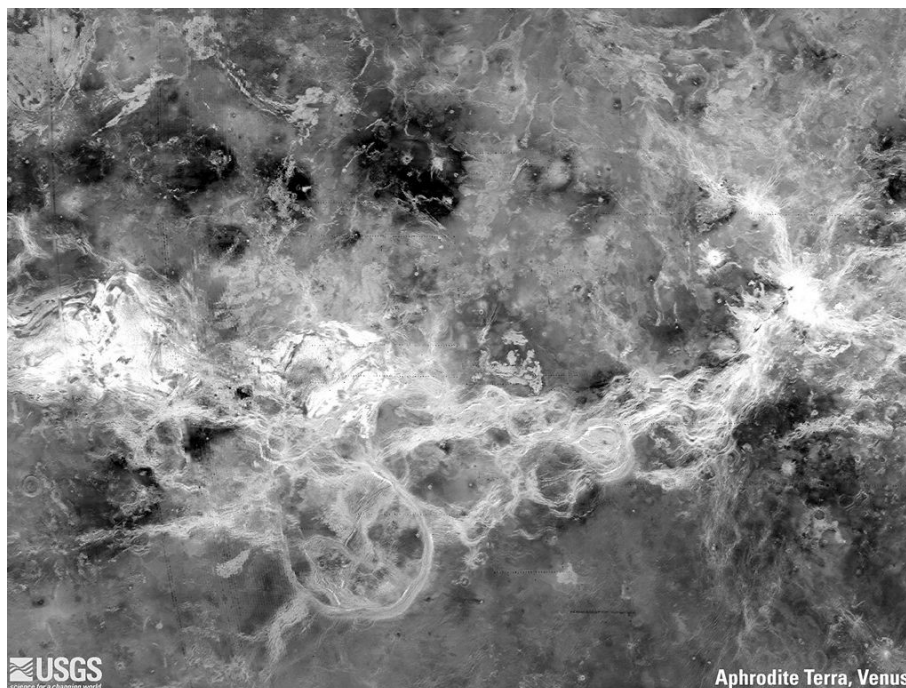
Obrázek 24: Topografická mapa oblasti Aphrodite Terra (2006).

(zdroj: https://en.wikipedia.org/wiki/Aphrodite_Terra#/media/File:Aphrodite_terra_topo.jpg)



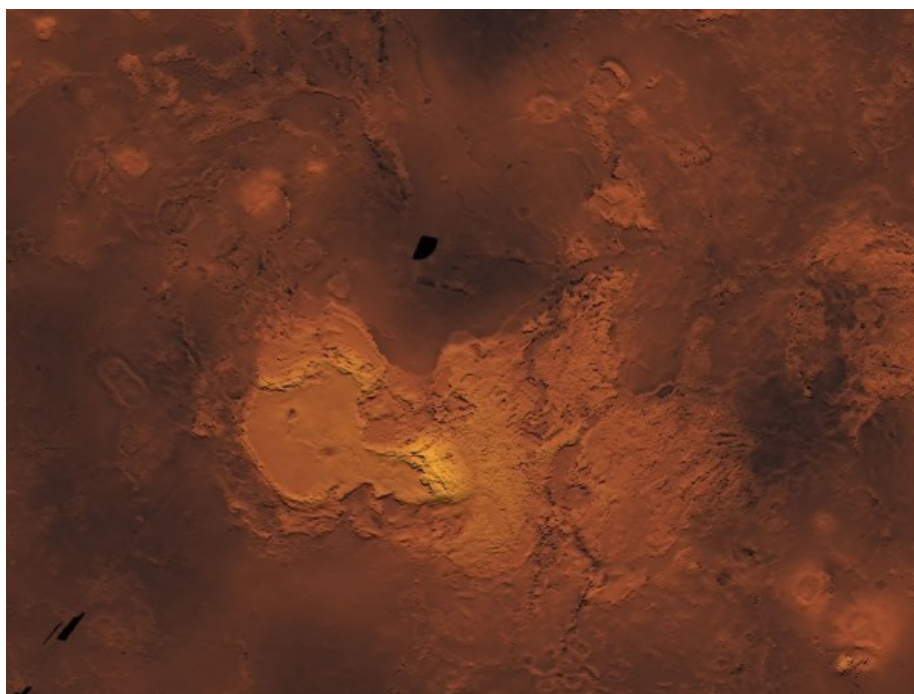
Obrázek 25: Topografická mapa oblasti Ishtar Terra (2006).

(zdroj: https://ru.wikipedia.org/wiki/Земля_Иштар#/media/File:Ishtar_terra_topo.jpg)



Obrázek 26: Oblast Aphrodite Terra má velmi členitý povrch, který je tvořený tesserou s nápadnými hřebeny a údolími (2007).

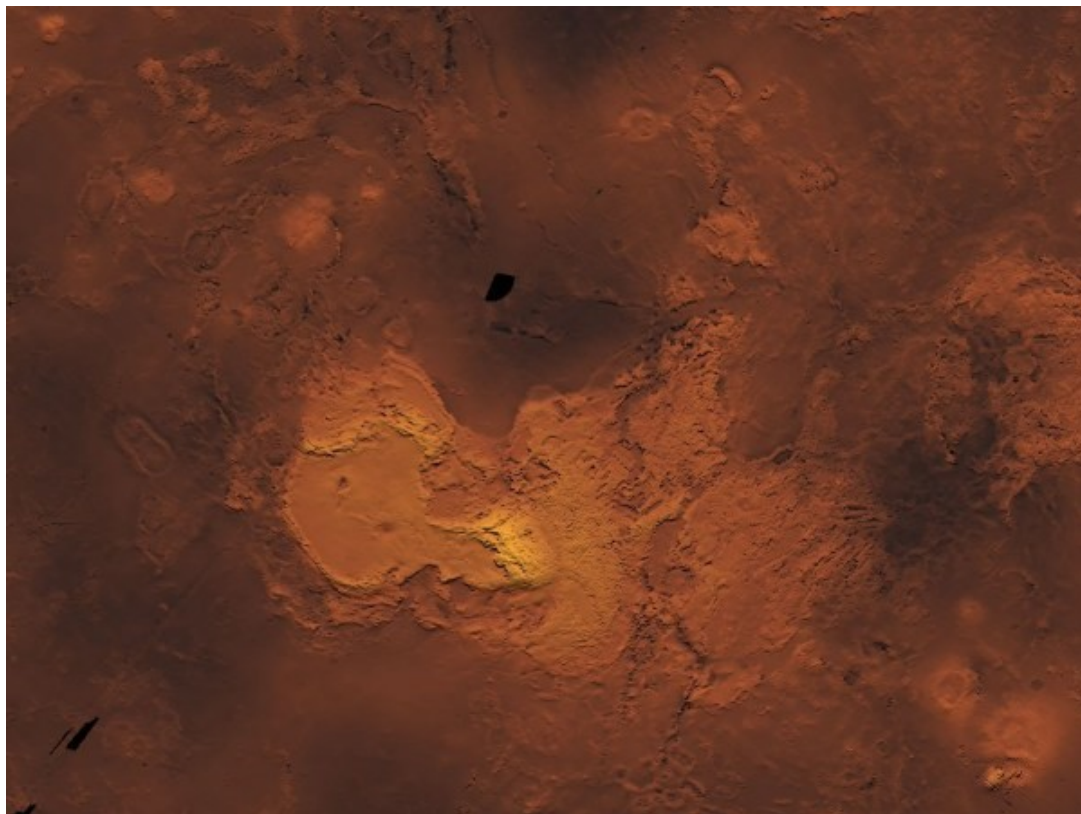
(zdroj: <https://astrogeology.usgs.gov/Gallery/ImageGallery/>)



Obrázek 27: Oblast Ishtar Terra s Maxwell Montes. Snímek byl vytvořen zpracováním dat z kosmických sond Venera 15 a Venera 16.

(zdroj: <https://www.kosmonautix.cz/2016/06/vyzkum-venuse-6-dil/>)

Hřbety typu **Tessera** vznikaly pravděpodobně ve stejném období jako rozsáhlé morfostrukturní celky Terra a většina z nich leží v oblastech pevninských masívů. Například Fortuna Tessera je umístěna ve východní části Ishtar Terra, její reliéf je charakteristický mozaikou zlomových linií a brázdami (obr. 28). Fortuna Tessera byla pojmenována podle období Fortunian, kdy se její hřbety vytvářely.

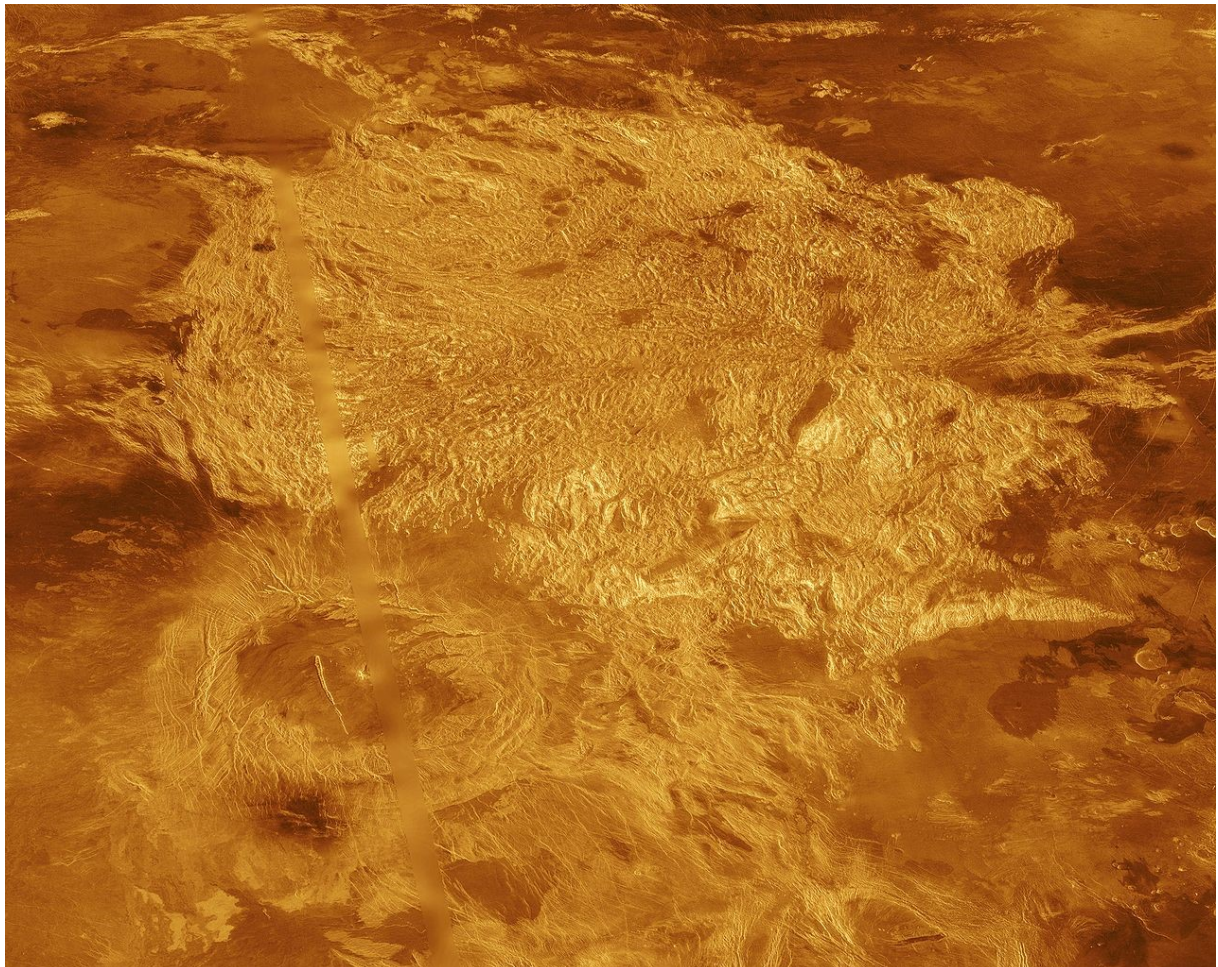


Obrázek 28: Oblast Ishtar Terra, v jejíž východní polovině jsou nápadné členité hřeben Fortuna Tessera.

(zdroj: <https://www.kosmonautix.cz/2016/06/vyzkum-venuse-6-dil/>)

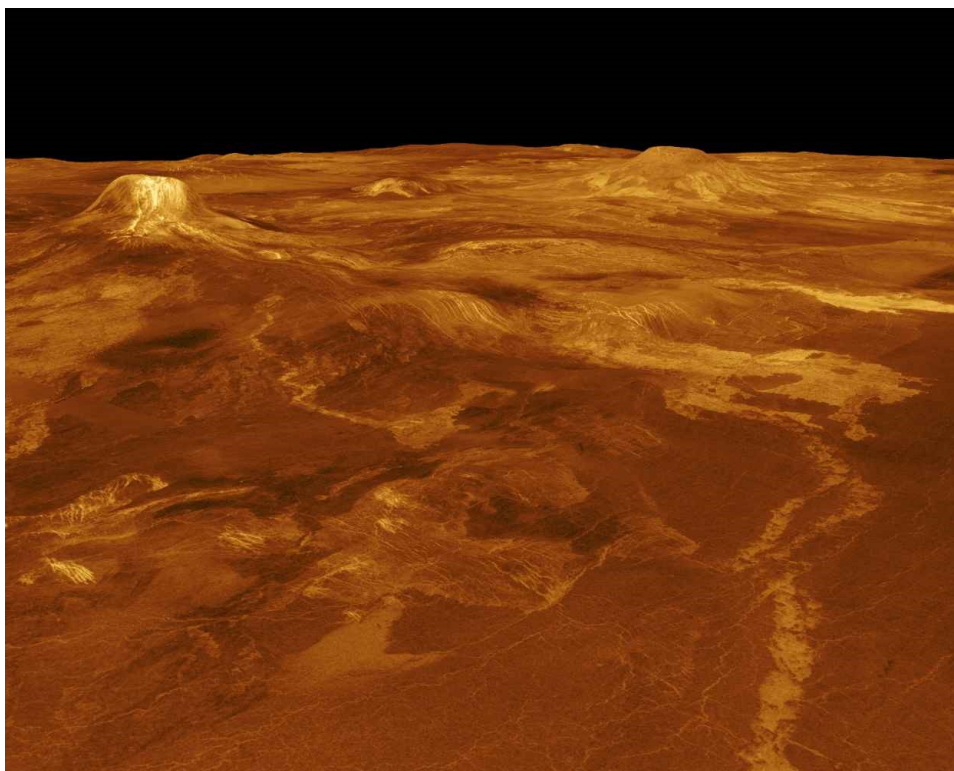
Hřbetové tvary a jejich rozčlenění vznikaly pravděpodobně klenbovým vyzvednutím nad okolní terén. Byly předloženy dvě hypotézy o vzniku hřbetů typu Tesserae. Modelová hypotéza „downwelling“ (Gilmore et al., 1998) vysvětluje vývoj Tesserae konvekčními procesy v plášti planety, které způsobují kompresi a zesílení kůry. Až po vyklenutí hřbetů Tesserae dochází ke vzniku lineárních útvarů. Naopak hypotéza „pulsating continents“ (Romeo, Turcotte 2008) předpokládá, že během období Fortunian byla kůra planety tektonicky rozčleněna a v oblastech s její nižší hustotou probíhaly při formování pevninských masívů (Terra) rozsáhlé subdukční procesy. V přepovrchových částech subdukčních oblastí pak bočními tlaky vznikly morfostrukturní hřbety typu Tessera a jejich další tektonické rozčlenění.

Na severní polokouli Venuše jsou všechny hřebenovité terény pojmenovány „Tessera“, zatímco na jižní polokouli a zčásti také v rovníkové oblasti planety jsou (z historických důvodů) označeny jako „Regio“ (obr. 29). Hřbetové terény **Regio** jsou rozlohou většinou menší než typické Tesserae. Tyto oblasti vznikaly během Fortuninu přibližně před 500 miliony let, a to procesem výstupu („upwelling“) magmatických proudů a následným formováním plášťových plumů (chobotů, resp. hřibů). Regia jsou antiklinálně vyklenuta nad okolním terénem o 1 až 2 km a jsou často modelována mladšími sopkami a lávovými proudy (obr. 30). V oblastech Alpha Regia a Beta Regia se vyskytují výrazně světlejší lokality než okolní terén (obr. 31), což může ukazovat na přítomnost granitoidních hornin.



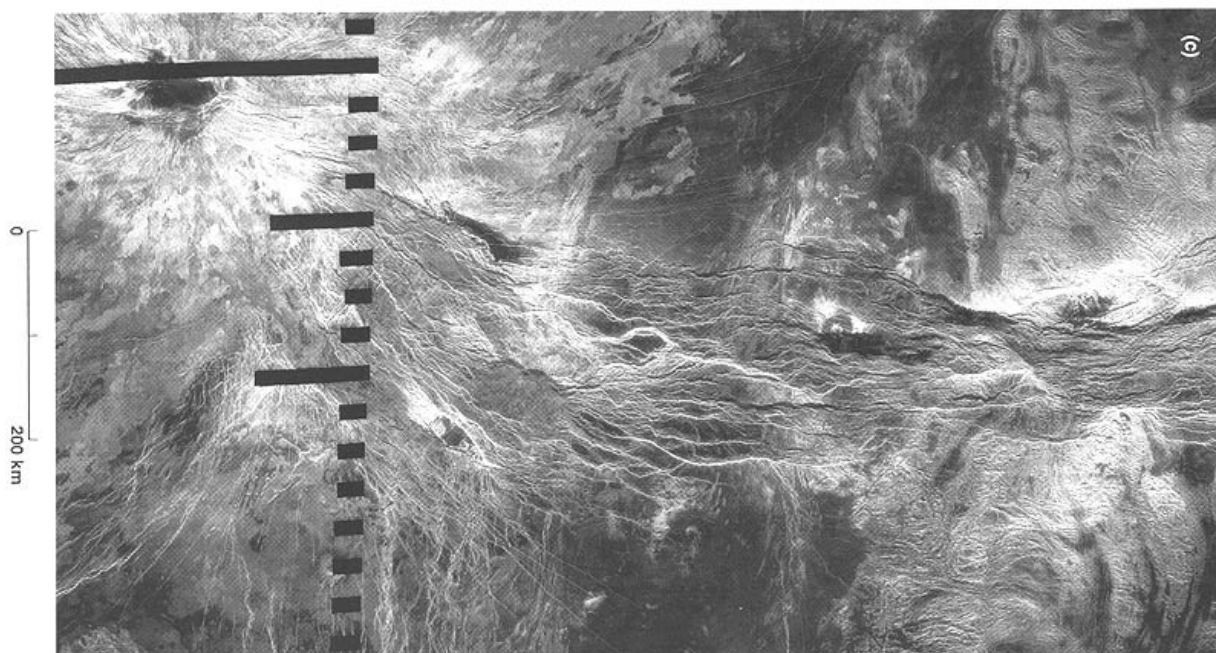
Obrázek 29: Členitý reliéf komplexu morfostrukturních tvarů vulkanického původu v oblasti Alpha Regia (3D model, 2005).

(zdroj: https://cs.wikipedia.org/wiki/Alpha_Regia#/media/File:Alpha_Regio_3D.jpg)



Obrázek 30: Lávvové proudy na tektonicky rozčleněných plošinách v západní části Eistla Regia s výraznými sopečnými masivy Gula Mons a Sif Mons (3D model, 2005).

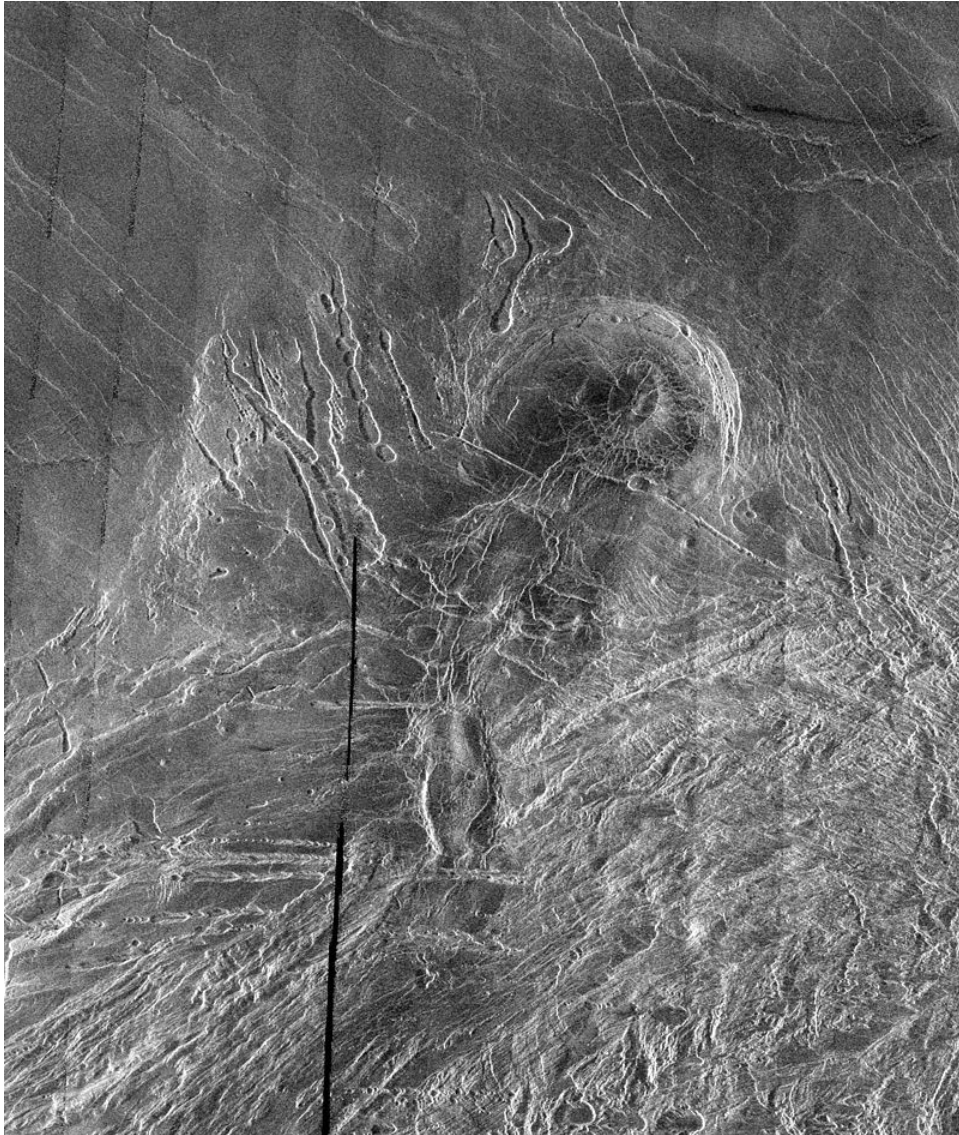
(zdroj: <http://solarviews.com/cap/venus/eistla1.htm>)



Obrázek 31: Sopečné masivy Rhea Mons, Thea Mons a Devana Chasma v centrální části Beta Regia mají nápadnou mozaiku lávvových proudů a lineamentů disjunktivní tektoniky (2007).

(zdroj: <https://history.nasa.gov/JPL-93-24/p95.htm>)

Nápadnými morfostrukturními tvary vulkanického původu jsou náhorní plošiny **Planum**, které vznikaly přibližně před 500 až 300 miliony let, tedy v období Guineverian. Náhorní plošiny Planum jsou součástí rozsáhlých masivů Terrae a Tesserae, přičemž vznikly pravděpodobně procesy „upwelling“ magmatu až po jejich vytvoření. Nejznámější z nich je Lakshmi Planum s rozsáhlými proudy bazaltických láv, která leží v západní části pevninského masivu Ishtar Terra (obr. 32) a je vyklenuta nad okolním povrchem nejméně o 4 km.

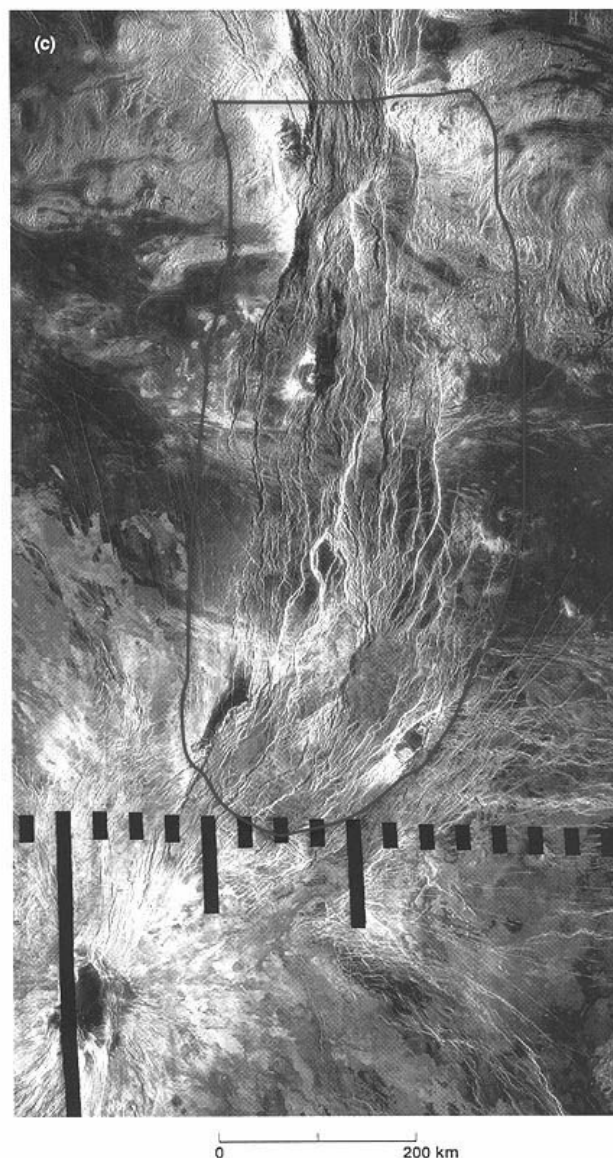


Obrázek 32: Složená série snímků z mise Magellan zobrazuje severní část Lakshmi Planum, která leží ve výšce cca 3,5 km nad středním poloměrem planety. V jižní části obrázku je zobrazen tektonicky intenzivně rozčleněný reliéf Clotho Testera. Kruhová deprese Siddons je pravděpodobně sopečnou kalderou (2007).

(zdroj: <https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA00240>)

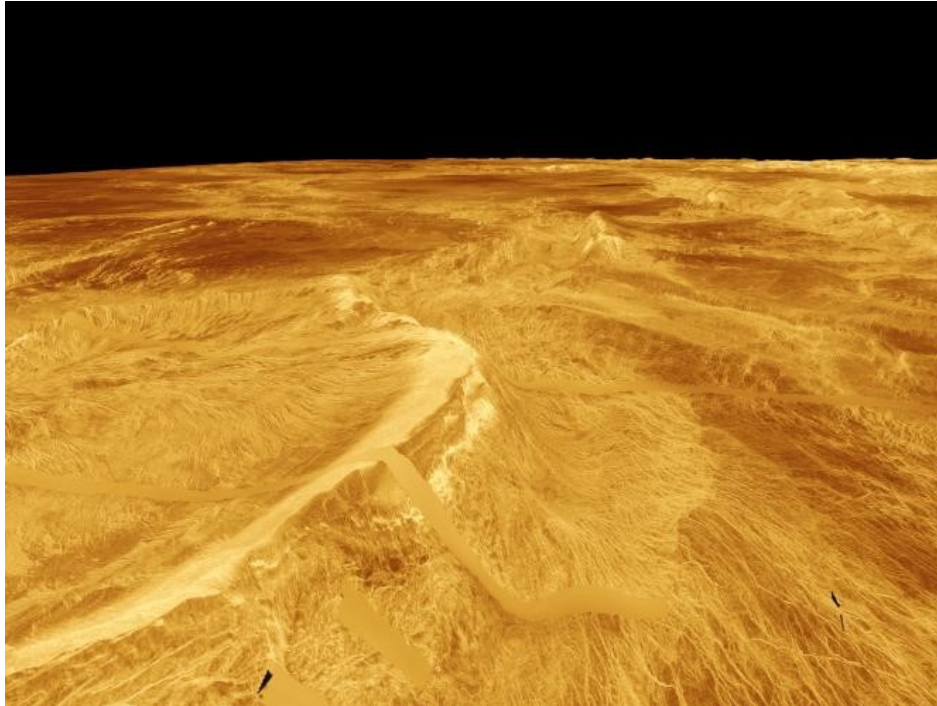
Útvary zlomového původu.

Zlomově podmíněná kaňonovitá údolí jsou nazývána **Chasma**, přičemž se pravděpodobně jedná o podobné morfostrukturní útvary, jakými jsou riftové zóny na Zemi. Podél těchto zón vystupuje magma z pláště planety až k jejímu tektonicky rozlámanému povrchu, vyplňuje zlomové deprese a vytváří i strmé svahy kaňonů (obr. 33). Jedním z největších riftových údolí na Venuši je Dali Chasma (obr. 34), na jehož okrajích byly (na radarových snímcích) zjištěny velmi světlé oblasti, které jsou pravděpodobně způsobeny vysokým obsahem pyritu ve vulkanických horninách.



Obrázek 33: Rozsáhlá riftová zóna Devana Chasma v centrální části Beta Regia je přibližně 1 050 km dlouhá a 80–240 km široká (2007).

(zdroj: <https://history.nasa.gov/JPL-93-24/p95.htm>, ručně opraveno)

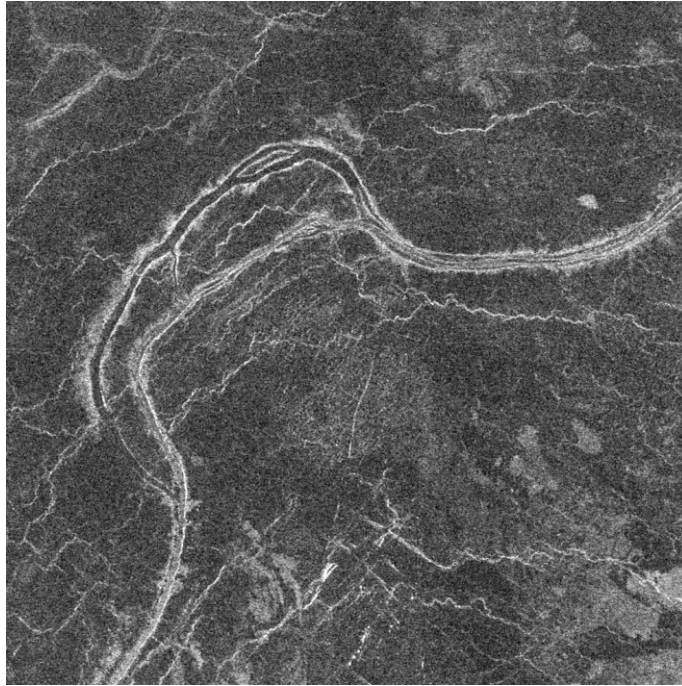


Obrázek 34: Členitý reliéf v oblasti Latona Corona má až 3 km hluboká koryta Dali Chasmu a morfologicky výraznou síť zlomů na ploše více než 7 400 km² (3D model, 1996).

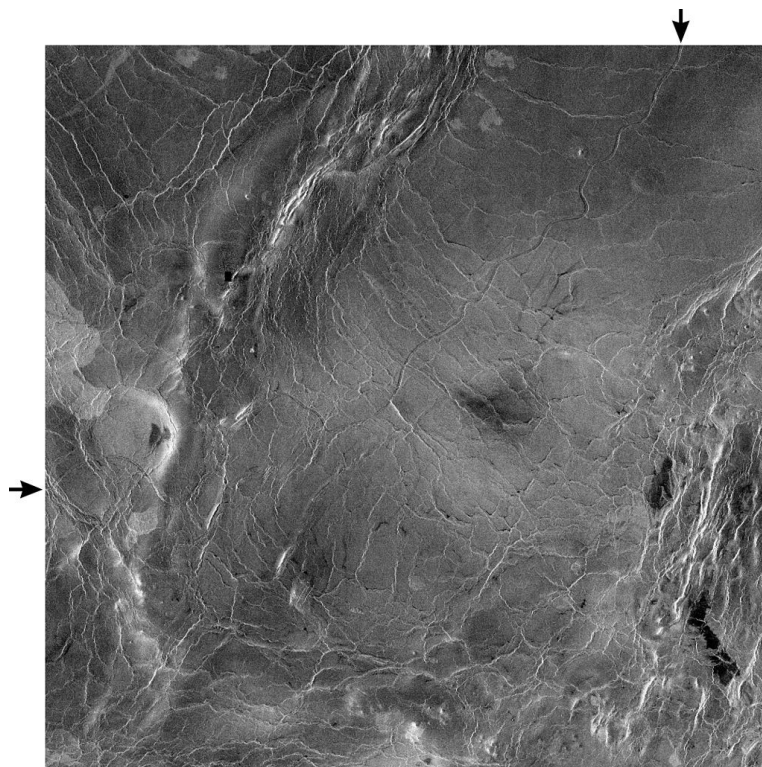
(zdroj: <https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA00268>)

Dalším morfostrukturním typem údolí jsou **Vallis**, které jsou interpretovány jako lávové kanály (obr. 35). Největším kanálem s výplní lávy na Venuši (a zároveň i v celé Sluneční soustavě) je Baltis Vallis, který leží na severní polokouli planety na 165° v. d. a 49° s. š. (obr. 36). Baltis Vallis má délku více než 7 000 km, oba konce jsou však zakryté lávami, takže původní délka tohoto kanálu není známá. Tato údolí typu Vallis mají na planinách Venuše podobný charakter a předpokládá se, že byla vytvořena a/nebo zvýrazněna erozí karbonátovými lávovými proudy s nízkou viskozitou (Oshigami, Namiki 2007). Širší údolí (brázda), které vzniklo tektonickými poklesy povrchové části litosféry Venuše, je nazýváno **Fossa** (obr. 37). Tato údolí jsou zčásti zaplněna mladšími lávovými proudy a rozčleněna zlomy několika generací.

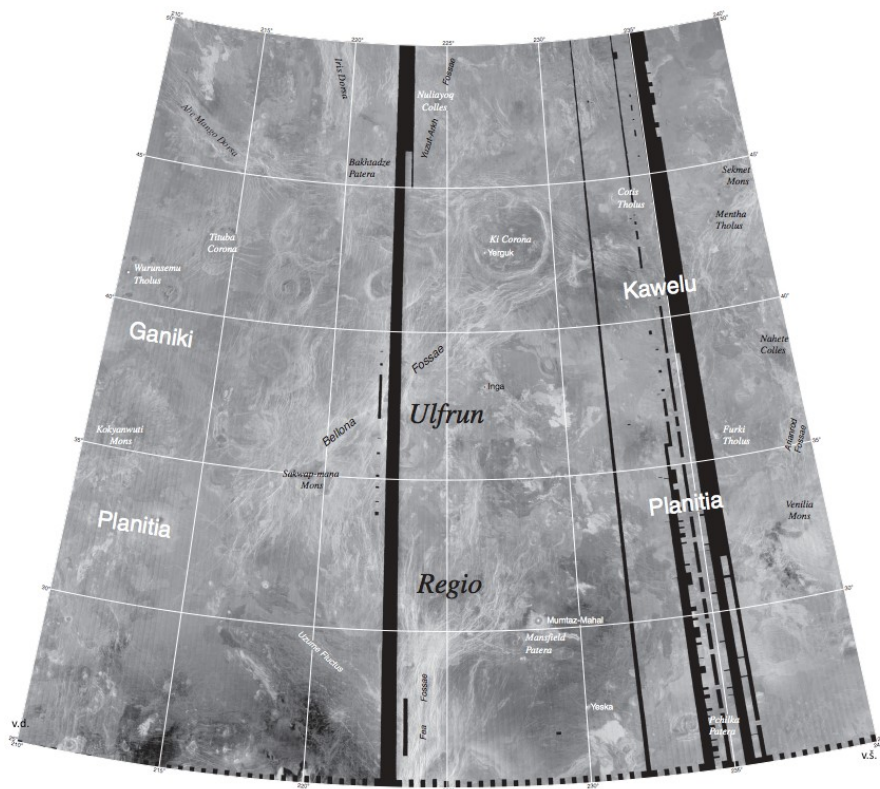
Zlomového původu jsou příkopy se strmými svahy na okrajích označované jako **Rupes**, které pravděpodobně vznikly rozlámáním kůry Venuše v kompresním režimu. Charakteristické jsou rozsáhlé sítě zlomů, často vyplněné lávovými proudy, a menší kotliny v těchto příkopech. Největší dosud známý příkop je Hestia Rupes s délkou přibližně 50 km, který leží na severozápadním okraji Aphroditae Terra (obr. 38).



Obrázek 35: Lávové kanály vytvořené na mírně členitém povrchu plošiny Sedna (2007).
(zdroj: https://nssdc.gsfc.nasa.gov/imgcat/html/object_page/mgn_f45n019_1.html)

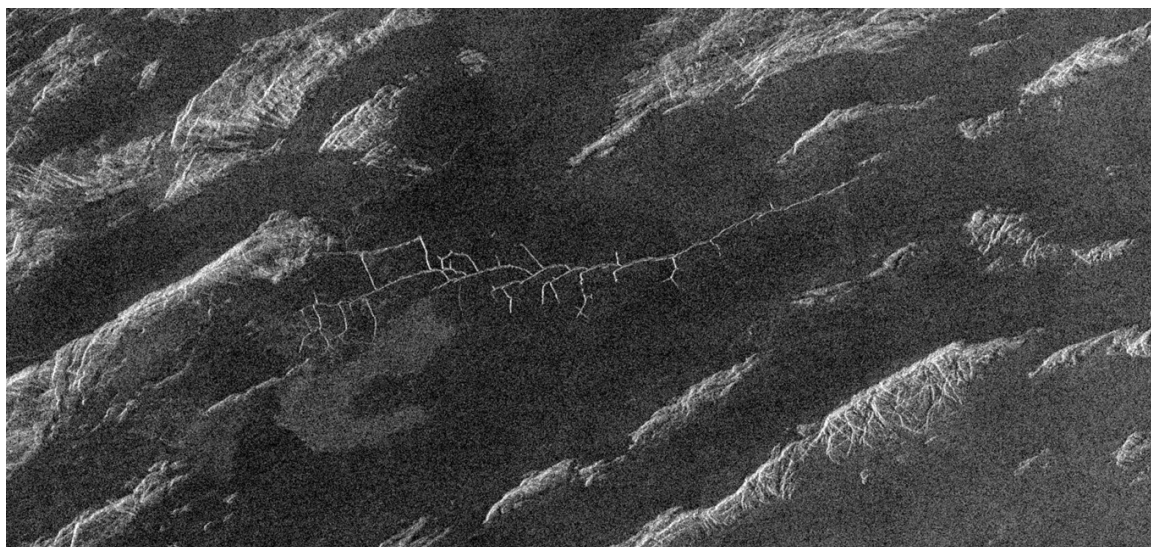


Obrázek 36: Údolí Baltis Vallis je pokládáno za nejdelší (dosud známý) útvar tohoto druhu v celé sluneční soustavě. Má šířku cca 2 km a délku přes 7 000 km, vzniklo vulkanickou činností a jeho dno zčásti leží pod nejmladšími lávovými proudy (1991).
(zdroj: <https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA00245>)



Obrázek 37: Složitě uskupení povrchových tvarů na planině Ulfrun Regio má nápadné lineární útvary brázd a koryt Bellona Fossae, které jsou pravděpodobně zčásti vyplněné lávovými proudy (2012).

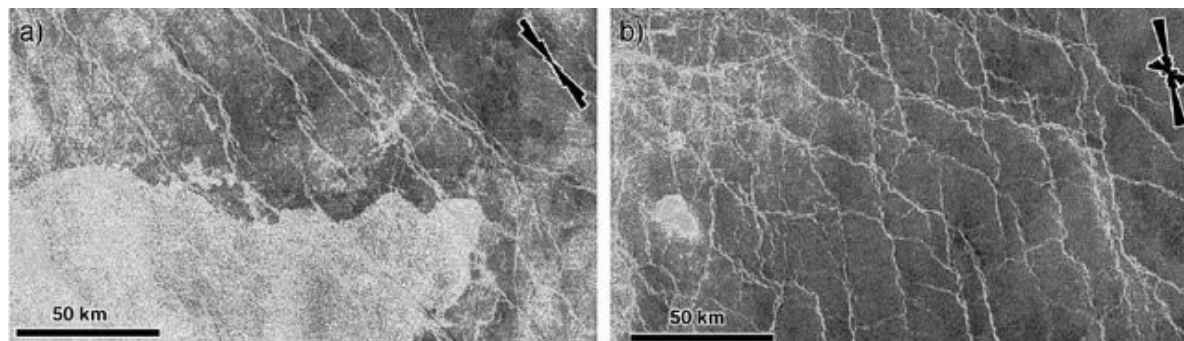
(zdroj: https://astrogeology.usgs.gov/search/map/Venus/Nomenclature/v15_comp)



Obrázek 38: Rozvětvená síť zlomů Hestia Rupes na severozápadním okraji Aphrodite Terra má délku přes 50 km a je umístěna v systému lávových proudů s projevy starší zlomové tektoniky (1991)

(zdroj: <https://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=PIA00469>)

Nápadné sítě zlomů jsou často vyvinuty na výlevech litologicky rozmanitých bazaltických láv ztuhlých v podobě zvlněných hřbetů **Dorsum** (obr. 39). Lokality reliéfu typu Dorsum jsou na Venuši uváděny (Bilotti et al. 1999), nejsou však dosud potvrzeny. Jejich popis a název jsou odvozeny podle podobných morfostrukturních tvarů na povrchu Měsíce.



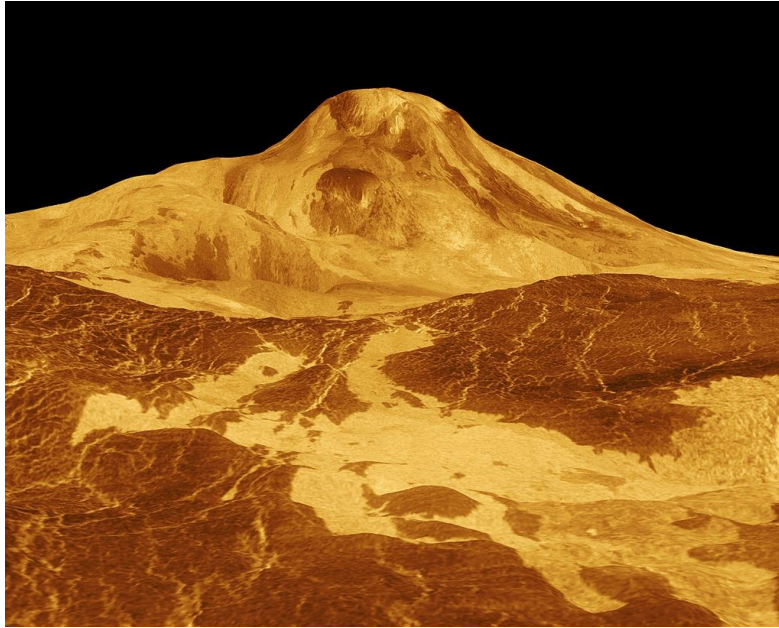
Obrázek 39: Příklad světlých a tmavých areálů litologicky různých vulkanických hornin rozčleněných mozaikou zlomů na hřbetech lávových proudů Wrinkle Ridges (1993).

(zdroj: Bilotti, Connors, Suppe, 1999)

Vulkanická tělesa.

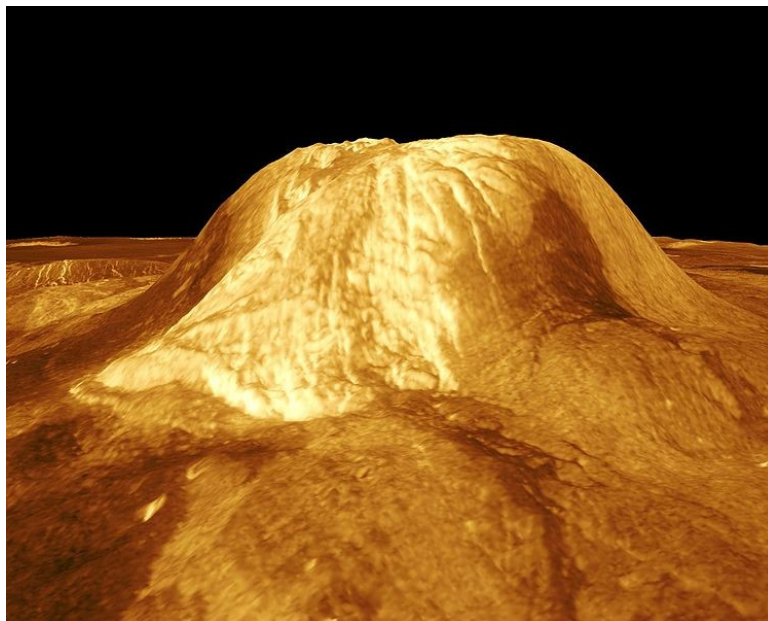
Významnou skupinou morfostrukturních tvarů jsou na Venuši vulkanická pohoří, horská pásma a skupiny sopek, v orografickém kontextu označovaných jako **Mons**, resp. **Montes**. Jejich komplex je pokládán za podstatně mladší než oblasti pevninských masivů a planin typu Terra a Planitia. Montes na Venuši vznikaly intenzivními tektonickými procesy v litosféře planety koncem období Guiverian, a to přibližně před 300 miliony let. Jednalo se převážně o procesy komprese vulkanického materiálu, které se na povrchu projevíly vývojem rozsáhlých horských kleneb a pásem. Nejvyšší horský systém na Venuši je Maxwell Montes, který je součástí Ishtar Terra.

Štítové sopky na Venuši vznikaly pravděpodobně vyklenutím litosféry (upwelling process) nad oblastmi vysoce horké hmoty v plášti (hotspots). Nejvyšší štítovou sopkou na této planetě je Maat Mons (obr. 40) s kalderou ve vrcholové části a nejméně pěti mohutnými krátery na jejích svazích. Jako příklady dalších štítových sopek na Venuši jsou uváděny Gula Mons a Sif Mons (obr. 41 a 42). Na severní polokouli Venuše, v centrální části Eistla Regio, leží štítová sopka Irnini Mons (obr. 43) s nápadnou kalderou a rozsáhlými výlevy pravděpodobně čedičových lávových proudů.



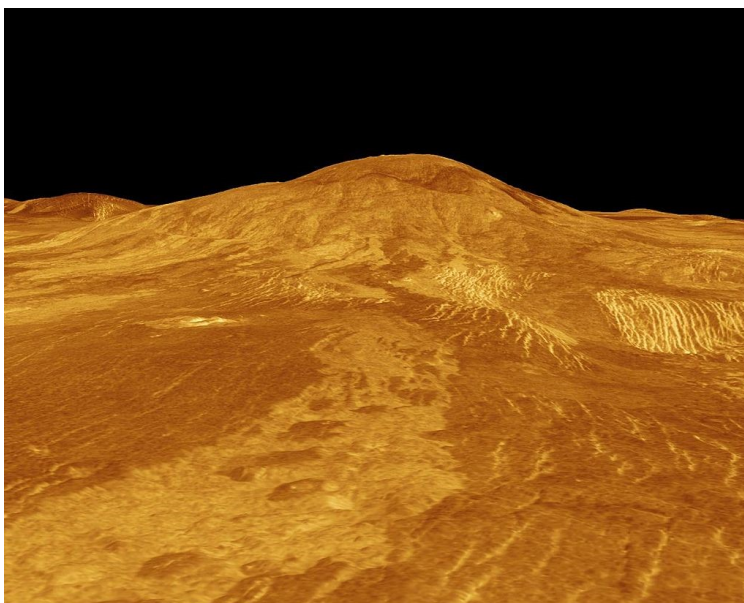
Obrázek 40: Sopka Maat Mons s výškou kolem 8 km (3D model, 1991) je tvořena mohutným centrálním masivem s výraznými projevy svahových pohybů, který je obklopen rozsáhlými, stovky kilometrů dlouhými lávovými proudy s členitým reliéfem a četnými zlomy.

(zdroj: <https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/pia00254>)



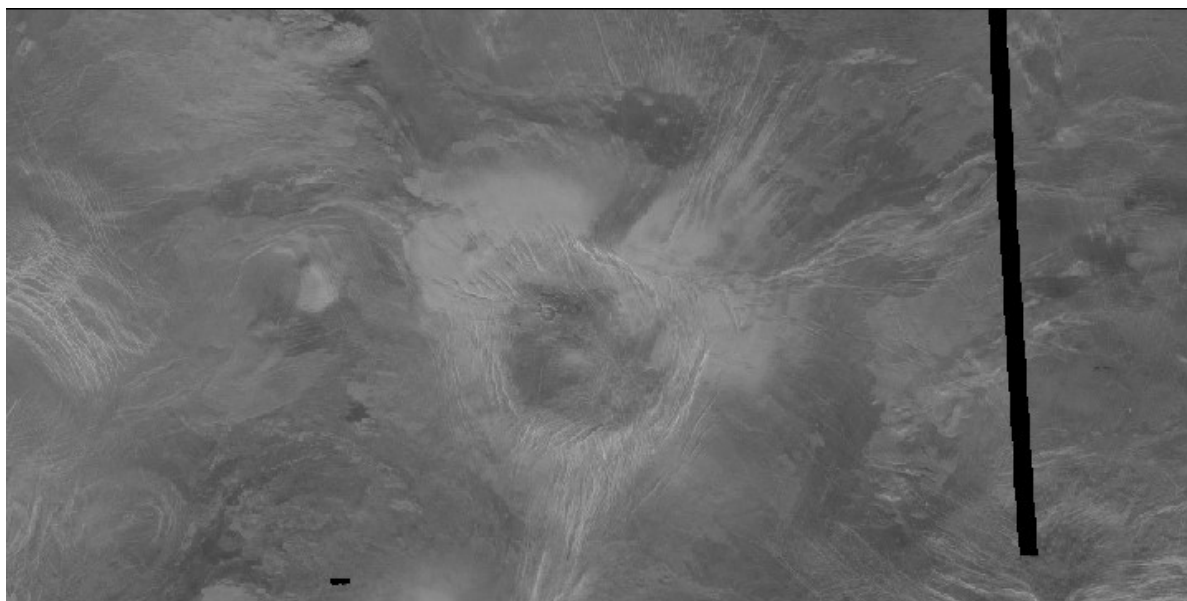
Obrázek 41: Sopka Gula Mons s výškou 3 km (3D model, 1991) vznikla v oblasti Eistla Regio opakovanými výlevy bazaltických láv s velkou viskozitou. Její skalnaté svahy jsou erodovány eolickou činností.

(zdroj: <https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA00234>)



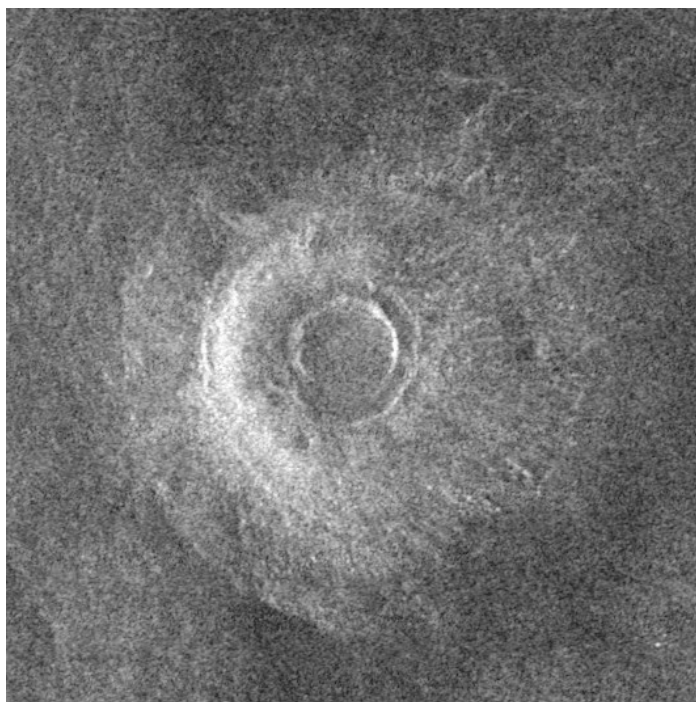
Obrázek 42: Sopečný masiv Sif Mons (3D model, 1991) má výšku 2 km a poloměr mohutných lávových výlevů cca 300 km. Ve zvlněném reliéfu lze odlišit (tmavé) starší lávové proudy, vrstevní plochy hornin (pravděpodobně) čedičového typu a síť zlomů.

(zdroj: <https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA00108>)

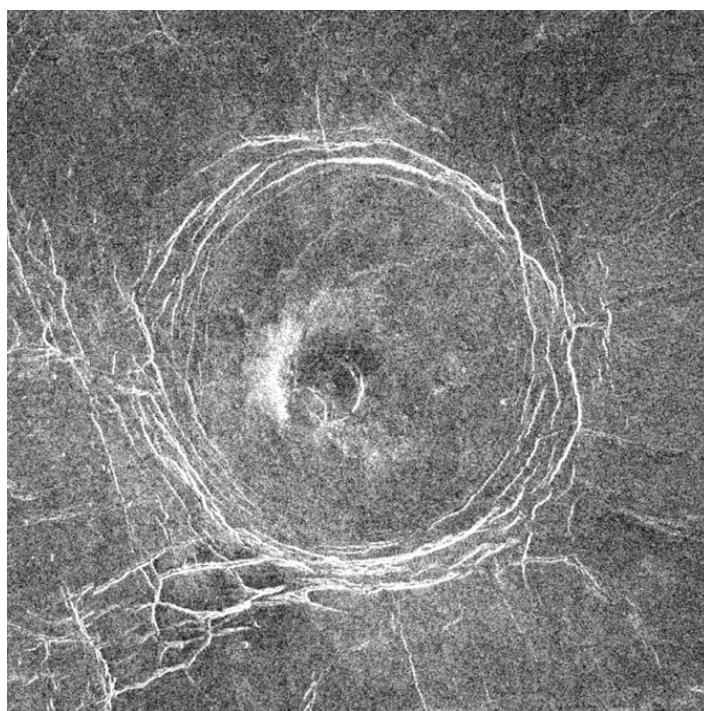


Obrázek 43: Sopečný masiv Irnini Mons má vyvinutou výraznou kalderu a zlomové zóny lineárního a síťového typu. Tento masiv byl objeven v centrální části Eistla Regio (2014).

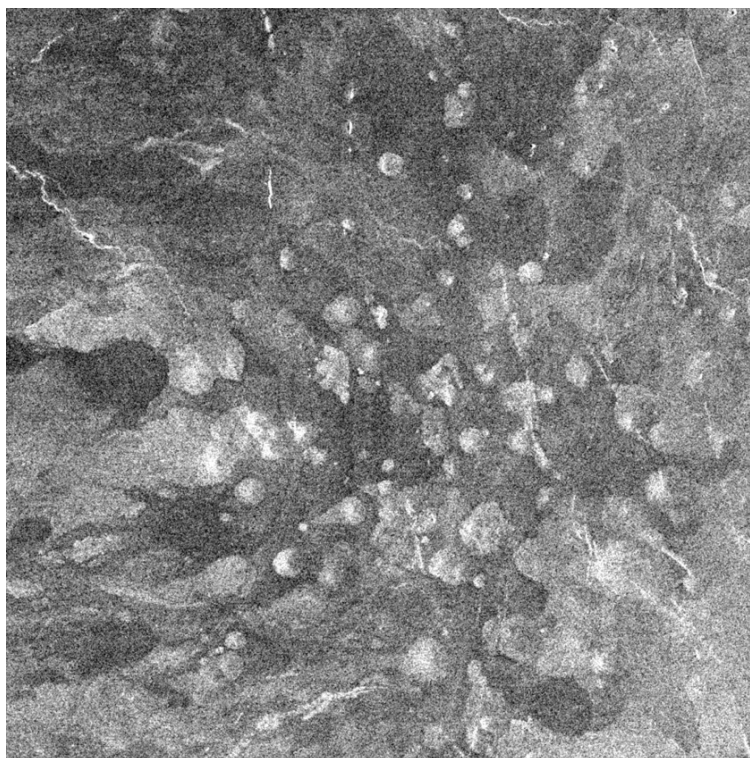
(zdroj: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/38/Irnini_mons.jpg)



Obrázek 44: Sopka Justitia Tholus s kalderou v centrální části má téměř kruhově symetrické výlevy láv a sekundární zlomové systémy. Rozsáhlý masiv je umístěn na planině Helen Planitia ležící na jižní polokouli Venuše (2015). (zdroj: <https://1url.cz/6MD1w>)



Obrázek 45: Kombinace několika typů zlomových sítí v okolí centrální části sopky Toci Tholus s kruhovým kráterem a členitým reliéfem. Tento sopečný masiv byl objeven na planině Sedna Planitia ležící na severní polokouli Venuše (2015). (zdroj <https://1url.cz/vMD1i>)



Obrázek 46: Celkový pohled na skupiny menších sopečných útvarů a lávové proudy různého stáří v oblasti Olosa Colles (2015). (zdroj: <https://iurl.cz/uMDIW>)

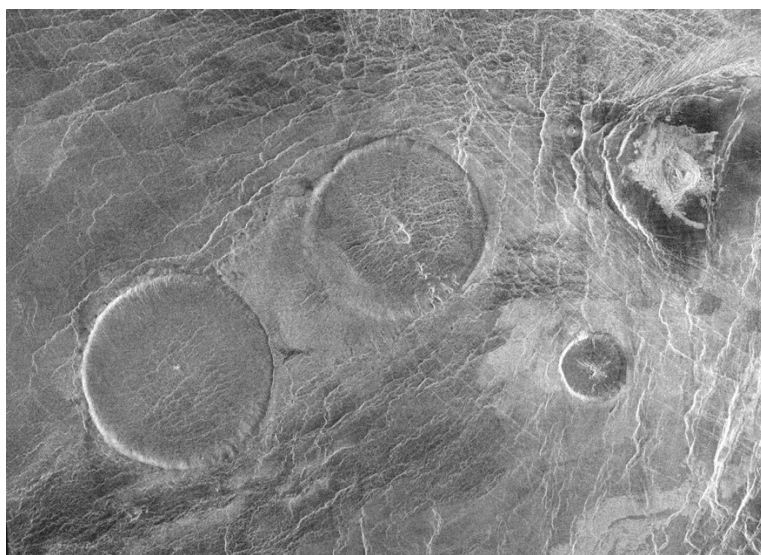
Poměrně malé kruhové kopce, resp. klenby pravděpodobně sopečného původu, jsou označovány (podle podobných povrchových tvarů na Marsu) jako **Tholus** (obr. 44 a 45). Oblasti se skupinami malých sopek, které převážně vznikaly ve stejném období jako horské systémy typu Montes, tedy před cca 300 miliony let, jsou nazývány **Colles** (obr. 46).

Velmi nápadnými morfostrukturními tvary, které byly objeveny na povrchu Venuše, jsou sopečné dómy typu **Farrum**. Jedná se o ploché sopečné kopule kruhového tvaru (tzv. „pancake domes“), které vznikaly při lokálních výlevech vysoce viskózní lávy na starší plochý povrch (obr. 47). Postupné ochlazování lávy těchto sopečných dómů vedlo k vytvoření několika generací lineárních zlomových zón a typické síťové mozaiky zlomů (obr. 48 a 49).



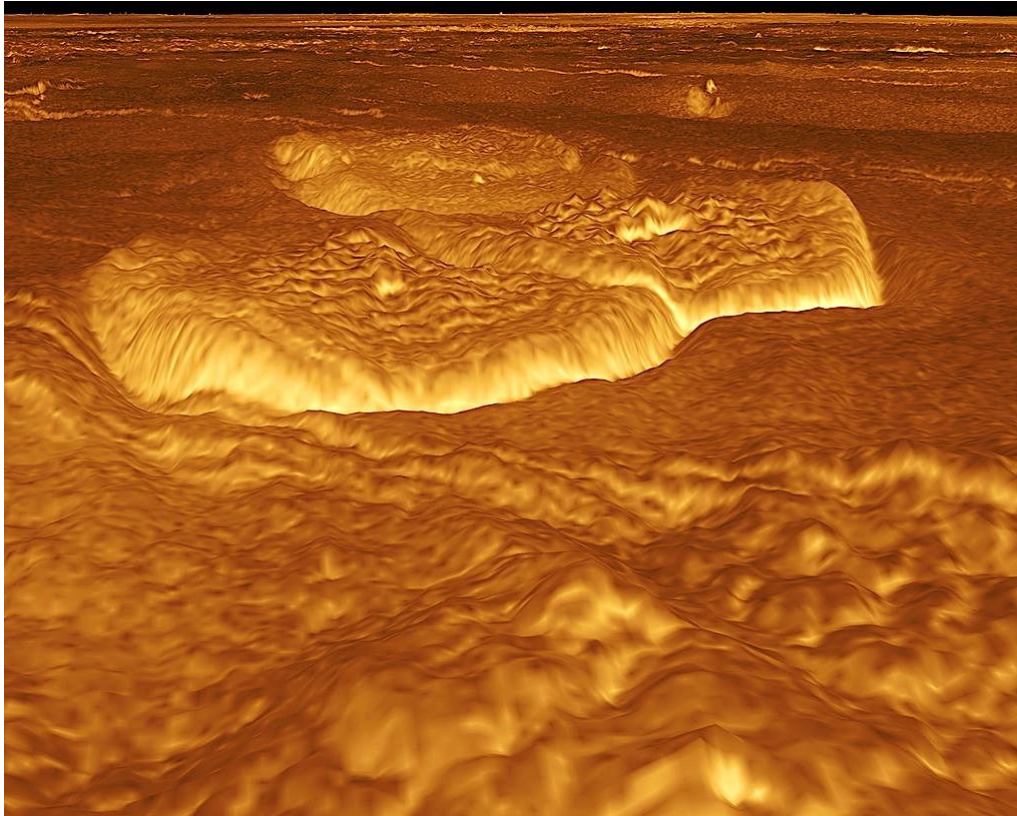
Obrázek 47: Výrazná skupina sedmi sopečných útvarů typu „pancake dome“ v oblasti planiny Alfa Regio s klenbou viskózních láv o průměru cca 25 km a výškou až 750 m. V okolí sopečných dómů i přímo na jejich povrchu jsou nápadné jak lineárně uspořádané zlomové zóny, tak složité mozaiky zlomových sítí (1991).

(zdroj: <https://wanderingvertexes.blogspot.com/2017/09/seoritsu-farra-on-venus-by-nasa.html>)



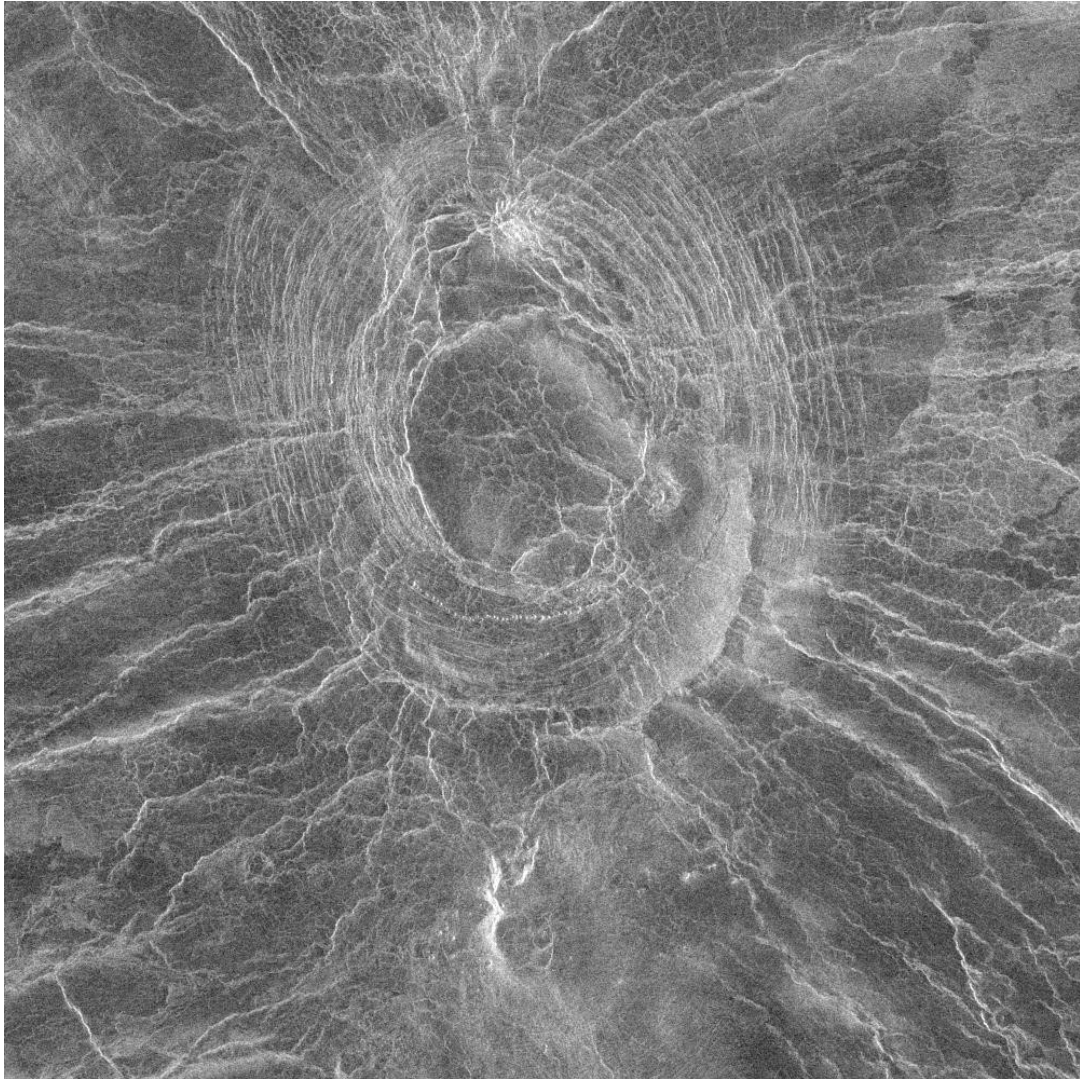
Obrázek 48: Nápadná skupina tří sopek typu „pancake dome“ nazvaná Carmenta Farra. Jedná se o kruhové a poměrně ploché sopečné útvary, přičemž největší z nich má poloměr 65 km a je cca 1 km vysoký. Malý kráter ve středu každé klenby je pravděpodobně zdrojovým kráterem lávových proudů. V pravém horním rohu snímku z roku 2015 je zaznamenán impaktní kráter Margareta. Carmenta Farra je umístěna v centrální části Eistla Regio.

(zdroj: https://www.lpi.usra.edu/publications/slidesets/3dsolarsystem/slide_04.html)



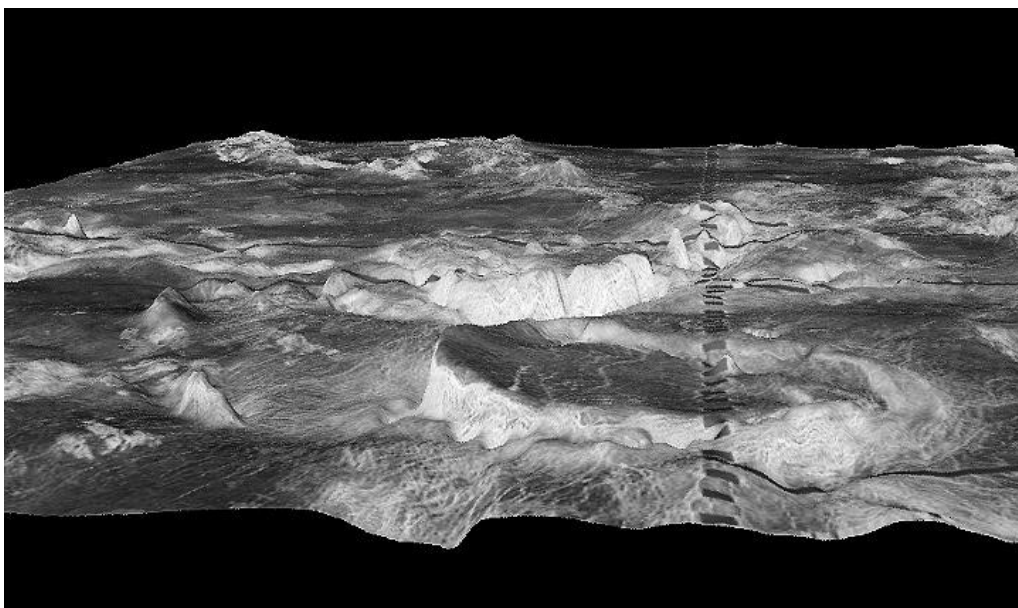
Obrázek 49: Snímek vulkanického útvaru „pancake dome“ na planinách východní části Alpha Regio (3D model, 1991) znázorňuje zlomy rozčleněné klenby lávových proudů.
(zdroj: <https://wanderingvertexes.blogspot.com/2017/09/seoritsu-farra-on-venus-by-nasa.html>)

Vulkanického a zlomového původu jsou také **Coronae** (koróny), které mají podobu oválných prohlubní s průměrem 100–600 km, obklopených prstenci hřebenů a zlomů (obr. 50). Velikost korón se pohybuje od několika stovek až do 600 km. Koróny vznikaly během celého období Guineverian, a to v několika etapách. Koróny se vyvíjely pravděpodobně působením horkého magmatu vystupujícího z pláště planety (Mašata 2012). Na povrchu Venuše pak proběhlo ochlazování magmatu a jeho pokles vlastní vahou do rozsáhlých dutin. Zároveň tyto tektonické procesy způsobily napětí a kontrakce v areálu koróny, při nichž vznikly paprscité a následně i kruhově uspořádané zlomové zóny (obr. 51). Oblasti takto vytvořených korón často zahrnují také mladší morfostrukturní tvary, např. typu Farrum, štítových sopek, hřbetů lávových proudů a zlomových systémů (obr. 52).

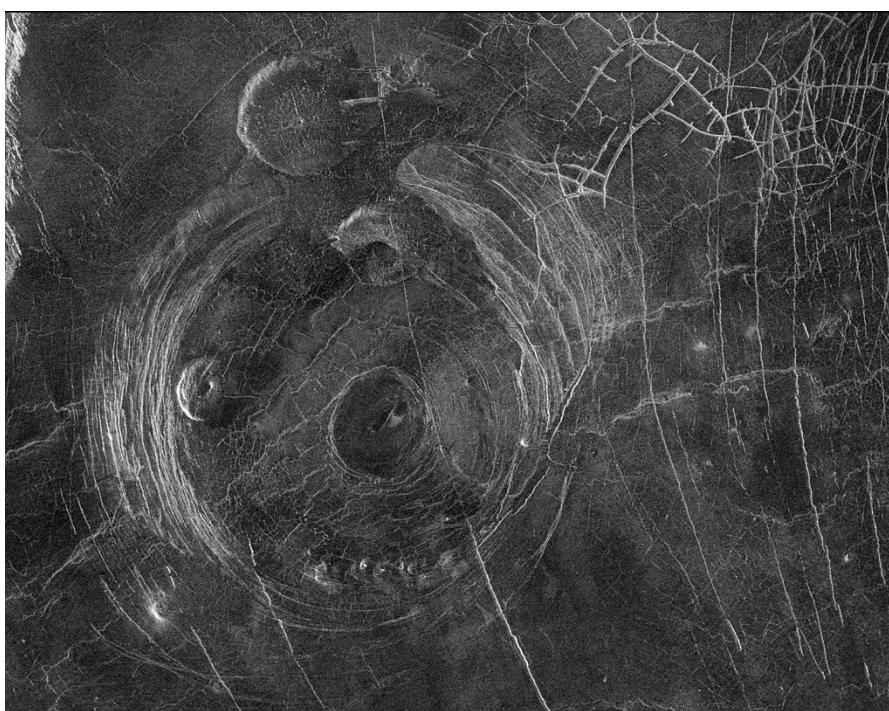


Obrázek 50: Členitý reliéf oválné koróny v oblasti Ovda Regio se vyznačuje radiálními zlomy a hřebeny, sopečnými krátery a lávovými proudy. Průměr centrální části koróny je cca 80 km a její deprese je o 3 km nižší než okolní hřebety. Předpokládá se, že centrální deprese koróny vznikají narušením pevné kůry proniknutím horkého magmatu k povrchu a jsou vymezeny oválnými zlomovými zónami. Tyto vulkanické procesy pokračují zejména rozsáhlými výlevy láv a vznikem sítě radiálních zlomů (1991).

*(zdroj: California Institute of Technology,
<https://pds.jpl.nasa.gov/planets/captions/venus/vencor.htm>)*

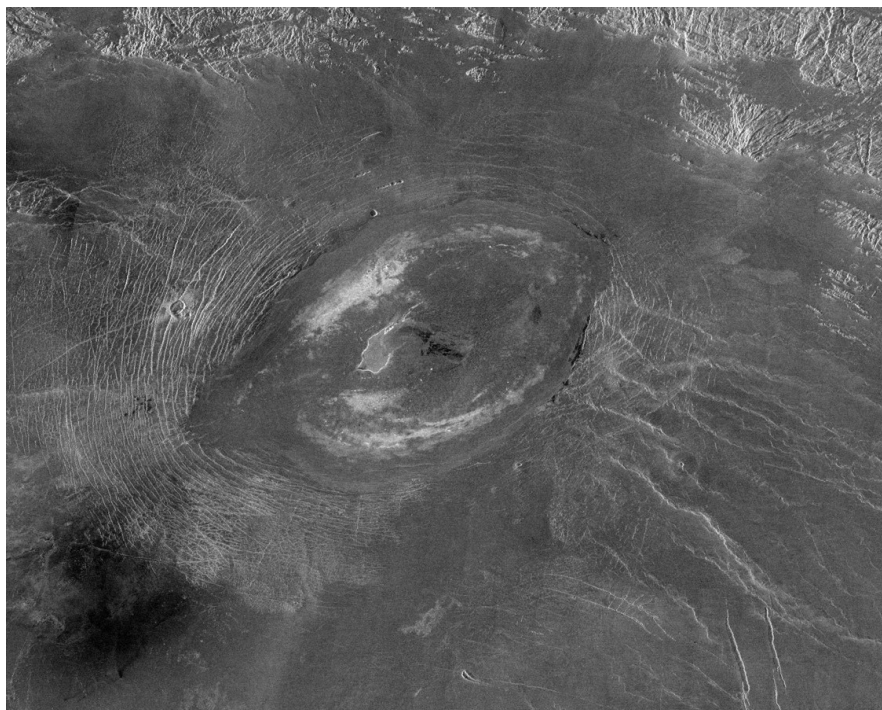


Obrázek 51: Zlomovými zónami rozčleněné hřbety lávových proudů v 500 km široké koruně Atete Corona zjištěné v oblasti Galindo (3D model, 2002).
(zdroj: <https://apod.nasa.gov/apod/ap020312.html>)



Obrázek 52: Typické morfostrukturalní uspořádání povrchových tvarů koróny na Venuši. Jedná se o kruhový útvar Aine Corona s poloměrem cca 200 km. Několik generací kruhových a lineárních zlomových zón rozčleňuje platformní i kruhové vulkanické masivy, včetně menších kopulí („palačinkové domy“) a nejmladších lávových proudů. Aine Corona je umístěna v jižní části Aphrodite Terra (1996).
(zdroj: <https://planetarynames.wr.usgs.gov/Feature/2000>)

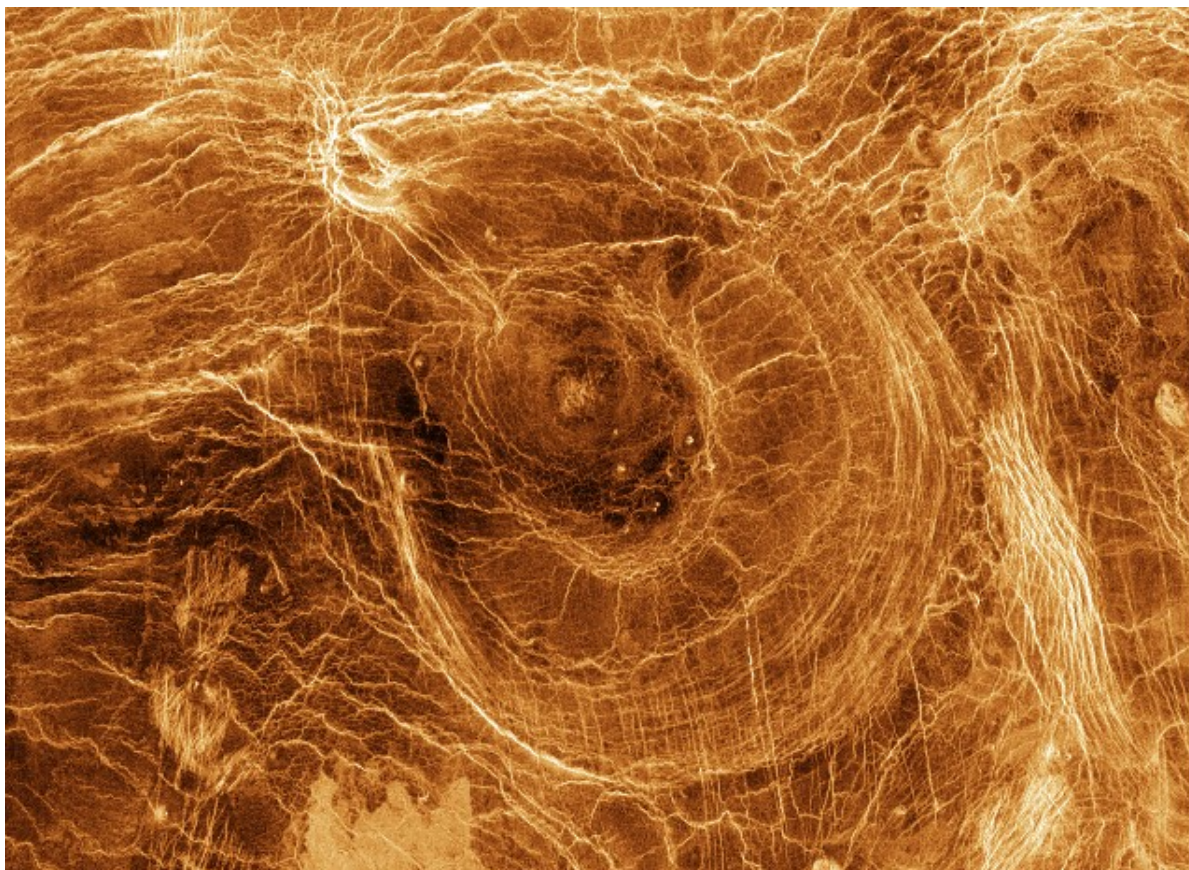
Tektonické poklesy, spojené pravděpodobně se „zhroucením“ magmatické komory v litosféře planety, vedly ke vzniku nepravidelných kráterů a typických kalder vulkanického původu, které jsou označovány jako **Patera**. Nejznámější z těchto morfostrukturních tvarů je Sacajawea Patera (obr. 53) na plošině Lakshmi v západní části Ishtar Terra.



Obrázek 53: Rozsáhlá kaldera sopečného masivu Sacajawea Patera byla objevena na planině Lakshmi Planum v západní části Ishtar Terra. Tato kaldera má šířku cca 420 km, hloubku 1–2 km a rozměry 120 x 215 km. Výrazná deprese v centrální části kaldery je vymezena obvodovými zlomovými strukturami. Vznik této kaldery je popisován jako povrchový projev zhroucení magmatické komory a lokální gravitační relaxaci kůry planety (2008).

(zdroj: <https://photojournal.jpl.nasa.gov/jpeg/PIA00485.jpg>)

Specifickými morfostrukturními systémy na Venuši jsou **Arachnoidea**. Jedná se o komplexní oválné až kruhové struktury, které vznikaly rozsáhlým rozlámáním litosféry, přičemž do zlomových zón pronikalo plášťové magma. V centrálních částech s průměry 50–230 km mají arachnoidy vyvinuty nápadné sopečné klenby a prstence zlomů vzniklé v několika etapách tektonické aktivity (obr. 54a). Uspořádání vulkanického a zlomového reliéfu arachnoid naznačuje (obr. 55), že mohly vznikat různými způsoby. Byla publikována i hypotéza, že představují úvodní fázi při postupném vývoji korón (Mašata 2012).



*Obrázek 54: Snímek členitosti morfostrukturního útvaru „pavoučí sítě“ Arachnoid Trorula Corona s průměrem cca 200 km (3D model, 1998).
(zdroj: <https://apod.nasa.gov/apod/ap980120.html>)*



Obrázek 55: Výrazná kruhová struktura Alta arachnoid s paprscitě se rozbihajícími zlomovými zónami a hřbety lávových proudů, která byla identifikována na sz. planinách Alta Regia. Tento komplex arachnoid má průměr centrální deprese cca přes 90 km a jeho uspořádání reliéfu je typické pro dosud zjištěné morfostrukturní útvary tohoto druhu na Venuši (1991).

(zdroj: http://volcano.oregonstate.edu/oldroot/volcanoes/planet_volcano/venus/complex_features2.html)

Fluctus.

Významnými morfostrukturními tvary jsou rozsáhlá území ztuhlých lávových proudů (Fluctus, lava flow field). Fluctus vznikly v oblastech, kde sopečná činnost probíhala (v geologickém časovém měřítku) velmi dlouhou dobu, což vedlo k vytvoření velkých objemů výlevných magmatických hornin, často značně rozčleněných mladšími zlomovými zónami. Příkladem je jedno z největších dosud známých lávových polí Mylitta Fluctus

(obr. 56), které se rozkládá na sever od zdrojové oblasti magmatu až tisíc kilometrů. Hlavním zdrojem magmatu v této skupině lávových proudů byla opakovaně aktivní štítová sopka.

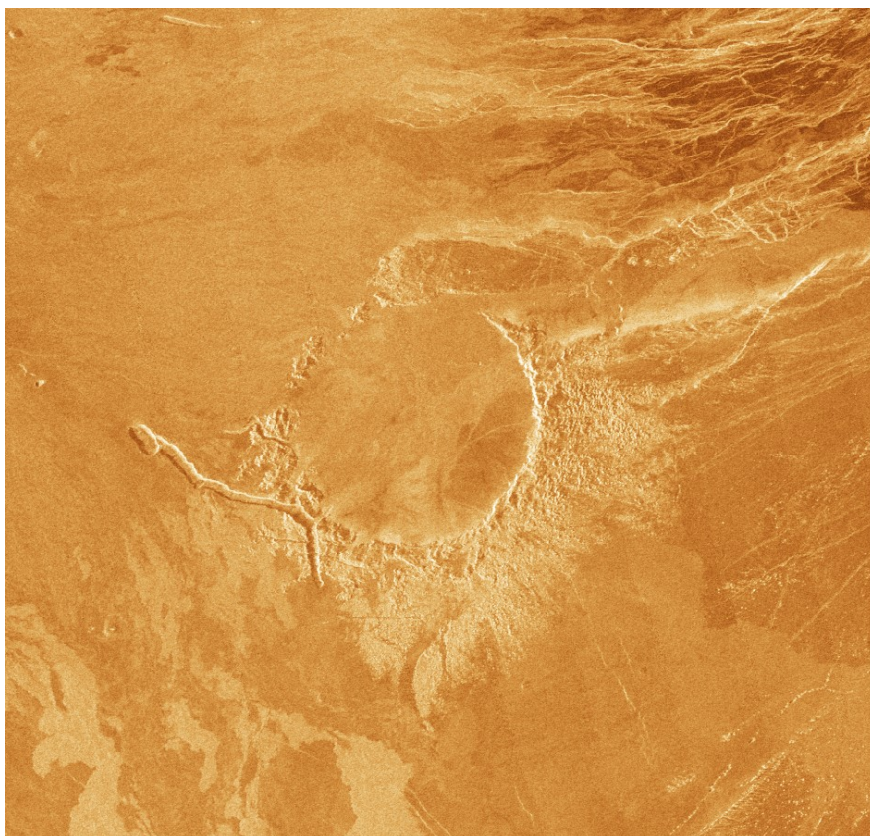


*Obrázek 56: Mohutné pole lávových proudů Mylitta Fluctus, které se rozkládá až 1000 km na sever od zdrojové oblasti, má šířku cca 460 km a ve směru od severu k jihu klesá o 2000 m. Soustava těchto lávových proudů vznikala postupně, a to pravděpodobně v 6 samostatných erupcích jedné zdrojové oblasti velké štítové sopky. (Snímek je z roku 1991.)
(zdroj: <https://airandspace.si.edu/multimedia-gallery/web12174-2011640jpg>)*

Impaktní krátery.

Povrchové tvary impaktního původu jsou na Venuši zastoupeny krátery, které vznikly dopadem impaktorů. Dosud bylo na této planetě identifikováno pouze kolem 1000 impaktních kráterů. Je pravděpodobné, že četnost impaktních kráterů je ovlivněna rozsáhlou přeměnou povrchu planety před 500–600 miliony let (Ivanov, Head 2013). Intenzivní vulkanická činnost byla v té době spojena s mohutnými výlevy magmatu. Starší impaktní krátery byly zničeny

nebo překryty lávou, takže stáří zachovaných impaktních kráterů se odhaduje na 500 až 300 milionů let. Většina morfologicky dosud zjištěných impaktních kráterů (cca 62 %) je však pravděpodobně mladší. V několika případech byly impaktní krátery zčásti změněny lávovými proudy a zlomovými zónami. Jedním z takových případů je kráter Alcott s poloměrem 63 km, který je téměř zakryt lávou (obr. 57). U jeho jihovýchodního okraje jsou zachovány reliкty světlých láv. Nápadná deprese směřující k jihozápadu je kanálem, kterým proudila láva a částečně zakryla starší impaktní kráter.

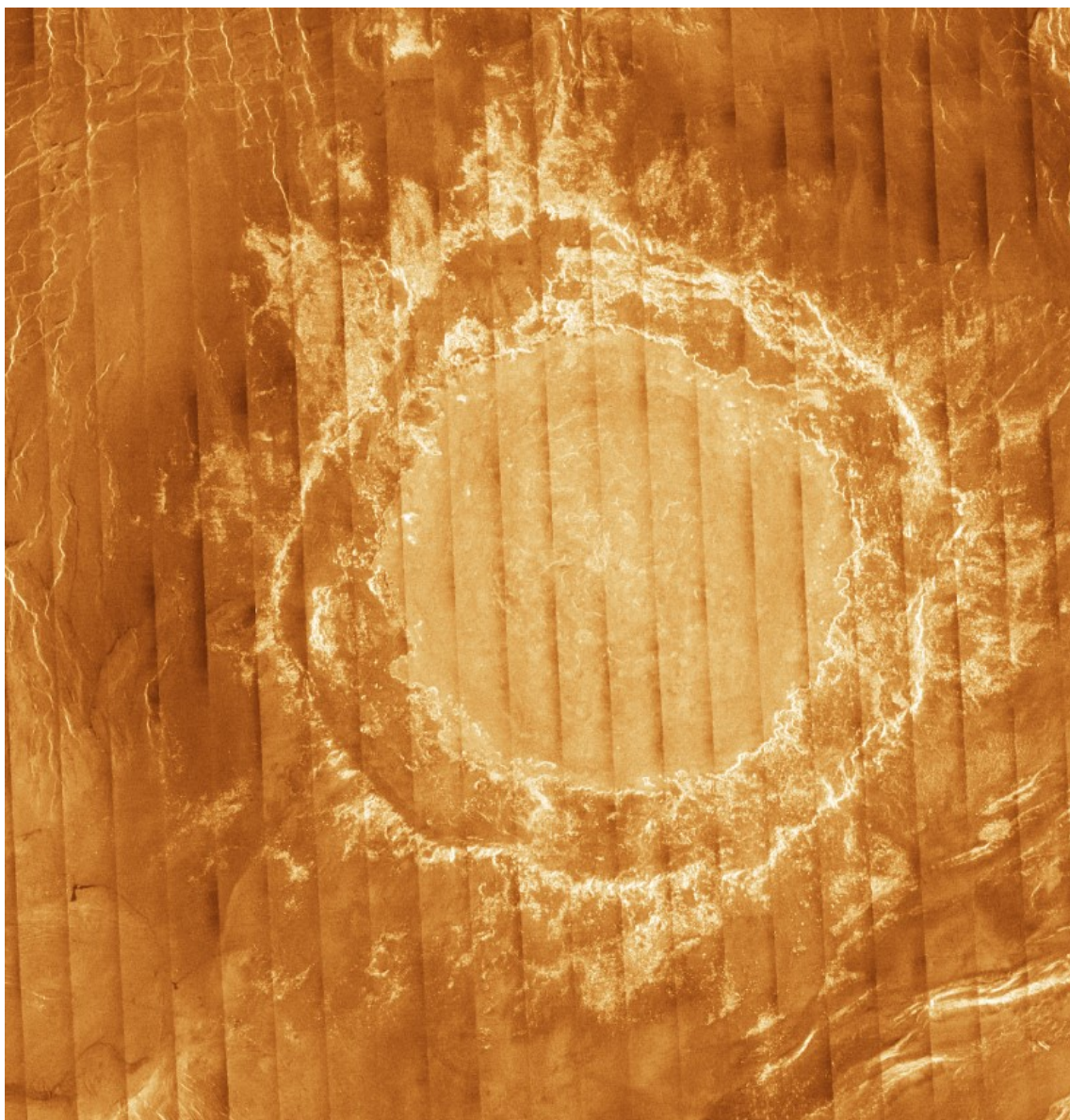


Obrázek 57: Sopečný kráter Alcott byl téměř zaplaven mladšími lávovými proudy. Nejsvětlejší zabarvení povrchu lávy na jv. okraji kráteru je příkladem útvarů označovaných jako „radar-bright ejecta“. Kráter Alcott je umístěn severně od Lada Terra na jižní polokouli Venuše (1991). (zdroj: <http://solarviews.com/cap/venus/alcott.htm>)

Menší četnost impaktních kráterů na Venuši je vysvětlována také hustou atmosférou, v níž menší impaktní tělesa shoří a zcela nebo částečně zaniknou. Nejmenší dosud zjištěný impaktní kráter má poloměr 2,4 km. Morfologicky mají impaktní krátery vyvinutou kruhovou depresi, často s centrálním pahorkem, která je obklopena prstenci (valy) hřbetů, tvořených silně rozrušenými horninami. Schaber et al. (1992) rozdělili impaktní krátery na Venuši, zjištěné pomocí radarových snímků Magellan (1990–1992), do 6 morfologických tříd:

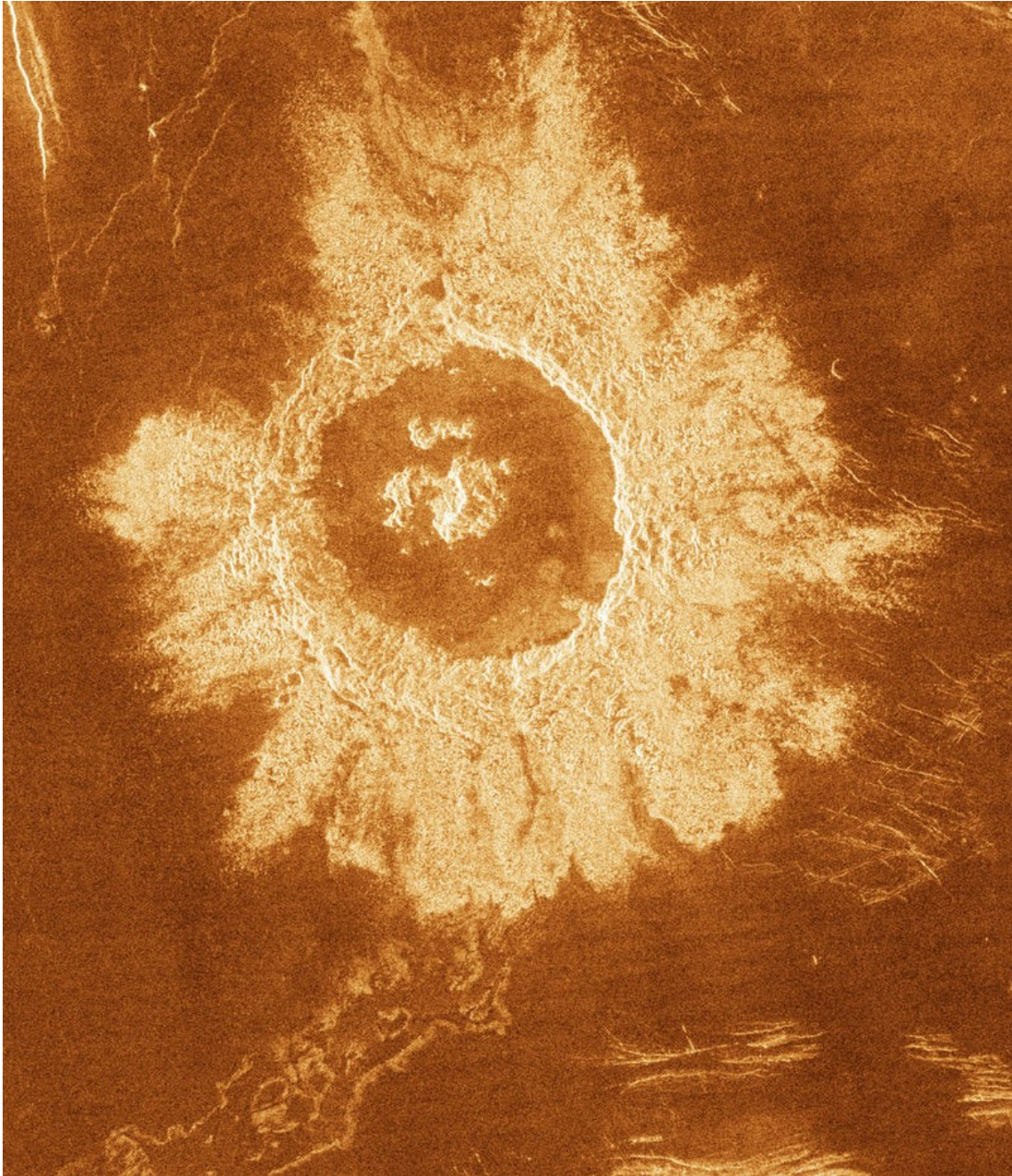
1. Krátery s více než dvěma prstenci (multi-ringed craters) jsou podobné velkým impaktním kráterům na Měsíci, Marsu a Merkuru. Tento typ zahrnuje všechny impaktní krátery s poloměrem větším než 100 km;
2. Krátery s dvěma prstenci (double-ringed craters) mají vnější prsten a vnitřní prsten. Většina impaktních kráterů z tohoto typu má poloměr větší než 40 km a patří k němu i největší impaktní kráter na této planetě. Jedná se o kráter Mead s poloměrem 280 km (obr. 58);
3. Krátery s centrálním pahorkem (central peak craters). Tyto impaktní krátery s četností 37 % mají centrální vrcholek v místě dopadu impaktoru. Jejich typickým příkladem je kráter Danilova (obr. 59);
4. Krátery s plochým dnem (craters with structureless floors) mají terasovité uspořádání svahů vnějšího prstenu a ploché dno;
5. Nepravidelné krátery (irregular craters) s členitým povrchem dna deprese impaktního kráteru mají většinou poloměr menší než 16 km;
6. Mnohonásobné krátery (multiple craters) jsou skupinou dvou nebo více kráterů, které pravděpodobně vznikly dopadem impaktoru, který se při průletu atmosférou planety rozpadl na několik těles.

Současný stav poznatků získaných dálkovým průzkumem povrchu Venuše umožňuje využívat základní topografické a morfologické údaje pro zjišťování typů a intenzity (zejména) endogenních procesů a jevů, které reliéf kůry v historii této planety vytvářely. Hlavní typy morfostrukturních tvarů, údaje o obdobích jejich vzniku a prostorovém uspořádání představují podstatnou informaci o časovém sledu a dynamice kvalitativních změn povrchových částí litosféry Venuše. Morfostrukturní členění Venuše svědčí o **polygenetickém vývoji reliéfu** zejména v oblastech, kde se společně vyskytují různé typy povrchových tvarů endogenního původu. Polygenetický reliéf Venuše indikuje všechny dosud známé tektonické režimy vytváření a změn pevné kůry planety, znázorněné na obr. 20 (Ivanov, Head 2013). Komplexní typy reliéfu jsou znázorněny na řadě dostupných snímků povrchu Venuše. Například na obr. 31 je dokumentován morfostrukturní celek typu Tessera (Regio), na kterém jsou rozmístěny povrchové tvary jak vulkanického původu (Rhea Mons a Thea Mons), tak zlomového původu (Devana Chasma). Na obr. 52 je znázorněna oblast Onda Regio (Tessera), v níž později vzniklo vulkanické těleso typu koróny a členitý reliéf se zlomovými systémy, hřbety, sopkami rozsáhlými lávovými proudy.



Obrázek 58: Největším impaktním kráterem na Venuši je Mead Crater s poloměrem (světlé) kruhové části 280 km. Tento impaktní kráter má vyvinuty dva prstence hřbetů, které vystupují nad starší lávové povrchy planiny a několik generací zlomových zón. Kráter je umístěn na západním okraje Aphrodite Terra (2006).

(zdroj: https://www.lpi.usra.edu/publications/slidesets/craters/slide_8.html)



Obrázek 59: Impaktní kráter Danilova s prstencem hřbetů má v centru kruhové deprese vyvinutou skupinu pahorků, tvořenou pravděpodobně magmatem uvolněným dopadem impaktoru. Členité svahy vnějších částí okrajových hřbetů tohoto impaktního kráteru se asymetricky sklánějí na starší lávové pokryvy planiny. Impaktní kráter Danielova je umístěn na planinách Venuše, přičemž na východě leží Dione Regio a na západě od kráteru leží Alpha Regio (1991). (zdroj: http://www.esa.int/ger/ESA_in_your_country/Switzerland_-_Deutsch/Venus_Zwillingsplanet_der_Erde)

7 DISKUZE

Dosavadní historie výzkumu terestrických planet a dalších těles Sluneční soustavy ukazuje, že pro podstatný pokrok v poznání přírodního prostředí Venuše jsou nezbytné výsledky systematických pozorování a technicky mimořádně náročných měření v průběhu dalších komplexně projektovaných kosmických misí k této planetě. V současné době je průzkum planety Venuše prováděn pouze jednou kosmickou sondou, a to japonskou misí AKATSUKI. Jejím hlavním cílem je průzkum dynamiky atmosféry, včetně původu a průběhu její super rotace. Japonská sonda AKATSUKI stále přenáší měřená data a další údaje o Venuši, které jsou analyticky zpracovávány a interpretovány výzkumnými týmy.

V základních rysech jsou známy výzkumné projekty několika připravovaných kosmických misí, jejichž hlavním cílem je podstatné rozšíření dosavadních poznatků o přírodním prostředí Venuše. Jedná se o kosmické mise Venera D, Venera Glob, VERITAS a DAVINCI. Největší z nich je kosmická mise Venera D (Венера Долгоживущая), která je výzkumným projektem Ruska s podporou USA. Rusko je v tomto projektu zastoupeno Institutem kosmického průzkumu ruské akademie věd (ИКИ РАН) a Roskosmosem, zatímco USA poskytuje vědecké týmy Národního úřadu pro letectví a kosmonautiku (NASA) [6]. Start sondy této kosmické mise je plánován na období 2029–2031. Je pravděpodobné, že Venera D bude působit jako kosmická stanice na oběžné dráze planety Venuše a zároveň ponese přistávací modul s komplexní stanicí vybavenou dlouhodobě fungujícími přístroji [20].

Hlavním výzkumným cílem kosmické mise Venera D má být zjištění původu extrémně silného skleníkového efektu v atmosféře planety [21]. Pro pochopení procesů, kterými vznikl a je dlouhodobě udržován skleníkový jev, je nutné podrobně prozkoumat tepelnou bilanci atmosféry Venuše, její dynamiku, strukturu a také chemické složení oblaků. Dalším cílem mise Venera D je poznání mechanismu vzniku a současných projevů zonální super rotace, což je spojeno i se snahou zjistit dlouhodobý vývoj atmosféry Venuše [21].

Významným badatelským záměrem připravované kosmické mise Venera D je také přímý průzkum povrchu planety a chemického složení hornin ve vybraných areálech a zároveň specifických interakcí mezi atmosférou a litosférou Venuše. Tímto přístupem budou získány podstatně podrobnější poznatky o morfostrukturních tvarech planety a jejich specifickém původu v různých etapách vývoje pevné kůry na Venuši. Předpokládá se jak potvrzení existence nejstarších morfostrukturních celků, tak objevení dalších oblastí současné sopečné aktivity a tektonicky aktivních zlomových pásem [21].

Podobné výzkumné úkoly bude mít i další plánovaná ruská kosmická mise Venera Glob. Prioritou má být sledování dynamiky atmosféry (případně zjištění údajů o ionosféře a magnetosféře), průzkum jejího chemického složení a současných parametrů skleníkového efektu. Venera Glob se má také zaměřit na detekci sopečné aktivity a na charakter interakce pevného povrchu a atmosféry planety [22]. Start kosmické mise Venera Glob je plánován na rok 2024.

Projekt VERITAS (The Venus Emissivity, Radio Science, InSAR, Topography, and Spectroscopy mission) je rozsáhlou kosmickou misí s předpokládaným startem v roce 2021. Hlavními cíli mise VERITAS, která je podporována NASA, jsou výzkumy vnitřní stavby, horninového složení litosféry a globální historie planety Venuše, včetně zjišťování indicií o současné vulkanické aktivitě, seismické činnosti a případné dlouhodobé existenci vody na jejím povrchu v minulosti. Dále mají být vytvořena podrobnější globální topografická zobrazení povrchu Venuše, základní mapy tektonických zón a horninového složení její kůry [23]. Tematicky podobným projektem je kosmická mise DAVINCI (Deep Atmosphere Venus Investigation of Noble gases, Chemistry, and Imaging) s plánovaným startem v roce 2021, který má být (s podporou NASA) převážně zaměřen na komplexní výzkumy spodních vrstev atmosféry Venuše a na podrobná zobrazení významných povrchových tvarů vulkanického, tektonického a erozního původu [24].

V této práci předložený souhrn dosavadních poznatků o přírodním prostředí Venuše naznačuje i důvody výběru tematických okruhů výše uvedených projektů výzkumu této planety v blízké budoucnosti. Kosmické mise směřující k Venuši mají podstatným způsobem rozšířit množství a kvalitu dat o její atmosféře, povrchu a vnitřní stavbě, což umožní hlouběji poznávat dynamiku procesů a jevů v jednotlivých sférách planety a jejich dlouhodobé interakce. Příkladem může být badatelsky i technicky zásadní téma vývoje povrchových tvarů specifickými druhy erozních procesů na Venuši, a to jak v průběhu postupného vývoje její litosféry, tak v současné době. Dostupné snímky povrchu této planety dokumentují zejména charakteristické rysy morfostrukturních tvarů (srov. kap. 6), případně povrchové tvary impaktního původu. Naopak údaje o zvětrávání povrchových částí horninových masivů, erozivním působení (mladších) lávových proudů, dále o svahových pohybech, eolické činnosti a dalších morfogenetických procesech založených na interakci mezi atmosférou a litosférou Venuše jsou dosud vzácné. Přitom poznatky o rozsahu denudace a eroze jejího povrchu jsou základem pro možnost vytvářet modely dlouhodobé historie přírodního prostředí planety.

8 ZÁVĚRY

Venuše je obvykle zařazována mezi planety terestrického typu. Její fyzikální vlastnosti a umístění ve sluneční soustavě jsou však globálními příčinami zcela unikátního přírodního prostředí, které je ve všech sférách planety podstatně odlišné od Země a Marsu. Cílem této bakalářské práce bylo popsat současný stav poznatků o přírodním prostředí Venuše. Přehled historie výzkumů této planety pozorováním ze Země a kosmickými sondami zdůrazňuje hlavní dosažené přírodovědecké cíle průzkumných misí, směřující k diskusi o plánovaných mezinárodních projektech v blízké budoucnosti.

V práci jsou uvedeny hlavní fyzikální charakteristiky Venuše jako celku a její postavení ve Sluneční soustavě, vnitřní stavba, topografie a atmosféra planety. Dále je ukázáno, že poznatky o současném reliéfu Venuše již umožňují identifikovat hlavní skupiny morfostrukturních tvarů a typy endogenních procesů, kterými v historii planety vznikaly.

V předloženém morfostrukturním členění povrchu Venuše jsou charakterizovány a graficky doloženy základní historicko-genetické vlastnosti a komplexní varianty reliéfu typu Planitia, Terra (včetně Tessera, Regio a Planum), zón tektonických zlomů (Chasma, Vallis, Fossa a Dorsum), vulkanických těles (Mons/Montes, Tholus, Colles, Farrum, Coronae, Patera a Arachnoidae), Fluctus a impaktních kráterů. Je vyjádřeno očekávání, že další průzkumy jednotlivých sfér této planety kosmickými misemi sondami budou zaměřeny také na dynamiku exogenních morfogenetických procesů a jevů, které na Venuši dlouhodobě probíhají při specifické interakci mezi kůrou (litosférou) a atmosférou.

Tematických okruhů pro ověřování dosud získaných poznatků nebo nezbytnou revizi hypotéz se vztahem k přírodnímu prostředí Venuše je velmi mnoho, což odpovídá (stále ještě) primární etapě kosmických výzkumů této planety. V kontextu věd o Zemi a možností systematické korelace výsledků výzkumů planet terestrického typu lze s ohledem na cíle této práce uvést příklady několika aktuálních problémů, zaměřených na historii a dynamiku přírodních procesů na Venuši.

Unikátním jevem je retrogradní rotace planety Venuše, tedy otáčení v opačném směru, než je orbitální pohyb planety. Tato retrogradní rotace má navíc různé periody pro pevné těleso této planety a pro její atmosféru. Zatímco planeta se kolem vlastní osy otočí jednou za 243 dnů, u atmosféry je tento pohyb mnohem rychlejší (super rotace), protože se kolem planety otočí již přibližně za 4 dny. Globální příčiny a dynamické důsledky tohoto jevu jsou v současné době intenzivně zkoumány.

Vnitřní stavba Venuše není významným zdrojem magnetického pole, což naznačuje specifické vlastnosti jejího jádra a pláště. Vnější magnetické pole planety je pravděpodobně indukováno převážně interakcí ionosféry s korpuskulárními částicemi slunečního větru. Souvislá kůra Venuše je tvořena bazaltickými horninami, má mocnost 15–50 km a není rozčleněna procesy deskové tektoniky. Dlouhodobý vývoj povrchu planety je tedy řízen endogenními procesy, a to s převahou epeirogenetických pohybů a epizodicky rozsáhlých vulkanických jevů.

Složitá struktura, vysoká hustota, specifické chemické složení a dynamika atmosféry Venuše jsou unikátním prostředím, v němž intenzivně probíhá řada procesů, které nebyly dosud v planetologii podrobněji popsány a vysvětleny. Hustá oblačnost v atmosféře Venuše podmiňuje výrazné skleníkové efekty, byly zjištěny silné elektrické jevy, rozmanitost vzdušných proudů a je předpokládána dlouhodobá intenzivní interakce atmosféry s bazaltickými hmotami kůry této planety.

Základní typy exogenních procesů (např. eolická činnost, včetně denudace troposférických proudů, eroze starších povrchů lávovými proudy a svahové pohyby) jsou zobrazením odpovídajících povrchových tvarů v dostupných materiálech do určité míry dokumentovány. Zobrazovací postupy povrchových tvarů Venuše ani provedená (ojedinělá) měření či analýzy složení hornin však nejsou zatím dostatečně podrobné, aby umožnily základní výzkum očekávaných unikátních typů zvětrávání hornin a erozních procesů exogenního původu.

Od prvních pozorování a měření přechodu Venuše přes sluneční disk, která v 17. století prováděli James Gregory a Edmond Halley pro výpočet vzdálenosti Země od Slunce, bylo o přírodním prostředí této planety získáno mnoho přírodovědeckých poznatků. Podstatné otázky o jejím dlouhodobém vývoji a současné dynamice procesů na Venuši však dosud zůstávají nevyřešeny.

LITERATURA

Publikace

- BILOTTI, F., CONNORS, C.D., SUPPE, J. (1999): Global distribution of wrinkle ridges on Venus; relationship to long-wavelength topography and gravity. *Icarus*, 139, 137–157.
- CORREIA, A.C.M., LASKAR, J., NÉRON DE SURGY, O. (2003): Long-term evolution of the spin of Venus I. theory. *Science direct*, 163, 1–23.
- ČEMAN, R., PITTICH, E. (2002): *Vesmír. 1, Slnečná sústava*. Slovenská Grafia, Bratislava.
- DINWIDDIE, R., EALES, P., HUGHES, D., NICOLSON, I., RIDPATH, I., SPARROW, G., SPENCE, P., SCOTT, C. (2005): *Universe*. A Penguin Company, London.
- GILMORE, M.S., COLLINS, G.C., IVANOV, M.A., MARINANGELI, L., HEAD, J.W. (1998): Style and sequence of extensional structures in tessera terrain, Venus. *Journal of Geophysical Research*, 103, E7, 16813–16840.
- HARRIS, L.B., BÉDARD, J.H. (2014): Crustal evolution and deformation in a non-plate tectonic Archaean Earth: Comparisons with Venus. *Springer*, 9, 215–288.
- CHASSEFIERE, E., WIELER, R., MARTY, B., LEBLANC, F. (2012): The evolution of Venus: Present state of knowledge and future exploration. *Planetary and Space Science*, 63–64, 15–23.
- IVANOV, M.A., HEAD, J.W. (2013): The history of volcanism on Venus. *Planetary and Space Science*, 84, 66–92.
- JONES, T., STOFAN, E.R. (2008): *Planetology: Unlocking the Secrets of Solar System*, National Geographic Society, Washington DC.
- KLECZEK, J. (2002): *Velká encyklopedie vesmíru*, Academia, Praha.
- KNOLLENBERG, R.G., HUNTEN, D.M. (1980): The microphysics of the clouds of Venus particle size spectrometer experiment. *Journal of Geophysical Research*, 85, A13, 8039–8058.
- KONOPLIV, A.S., YODER, C.F. (1996): Venusian k_2 tidal Love number from Magellan and PVO tracking data. *Geophysical Research Letters*, 23, 14, 1857–1860.
- KORONOVSKIY, N.N. (2004): Морфология поверхности планеты Венера, *Соровский образовательный журнал*, 1, 57–62.
- KUZMENKOV, E.V. (2018): *Гимн небес*, ЛитРес: Самоиздат, Москва.
- LAIFR, V. (2012): Jména na Venuši. Tisíce žen a jediný muž. *Astropis, Speciál 2012*, 27.
- LOMONOSOV, M.V. (1986): *Избранные произведения. Том 1*. Наука, Москва, 353–358.
- LORENZ, R.D. (2015): Heights of Fortuna-Meshknet Dunes (Al-Uzza Undae), Venus, from Magellan radarclinometry. *Fourth International Planetary Dunes Workshop*, 1843, 8004.

- MAŠATA, R. (2012): Zahalená tajemství Venušina povrchu. *Astropis, Speciál 2012*, 34–35.
- MIKKOLA, S., BRASSER, R., WIEGERT, P., INNANEN, K. (2004): Asteroid 2002 VE68, a quasi-satellite of Venus. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 351, 3, 63–65.
- NEWMAN, M.J., ROOD, R.T. (1977): Implications of solar evolution for the Earth's early atmosphere. *Science*, 198, 4321, 1035–1037.
- OSHIGAMI, S., NAMIKI, N. (2007): Cross-sectional profiles of Baltis Vallis channel on Venus: Reconstructions from Magellan SAR brightness data. *Icarus*, 190–1, 1–14.
- PAUER, M. (2004): Fyzika Venuše. *Astropis*, 2, 16–21.
- PÄTZOLD, M., HÄUSLER, B., BIRD, M.K., TELLMANN, S., MATTEI, R., ASMAR, S.W., DEHANT, V., EIDEL, W., IMAMURA, T., SIMPSON, R.A., TYLER, G.L. (2007): The structure of Venus' middle atmosphere and ionosphere. *Nature*, 450, 657–660.
- PICCIONI, G., DROSSART, P., SANCHEZ-LAVEGA, A., et al. (2007): South-polar features on Venus similar to those near the north. *Nature*, 450, 637–640.
- RAJKUNOV, G.G. (2014): Фундаментальные космические исследования. Книга вторая. Солнечная система. Физматлит, Москва, 204–217.
- RAYMOND, S.N., QUINN, T., LUNINE, J.I. (2006): High-resolution simulations of the final assembly of Earth-like planets. I. Terrestrial accretion and dynamics. *Icarus*, 183, 265–282.
- REDD, N.T. (2012a): How Big is Venus? *Science&Astronomy*.
- REDD, N.T. (2012b): How hot is Venus? *Science&Astronomy*.
- ROMEO, I., TURCOTTE, D.L. (2008): Pulsating continents on Venus: An explanation for crustal plateaus and tessera terrains. *Earth and Planetary Science Letters*, 276, 1–2, 85–97.
- SCHABER, G.G. (1992): Geology and distribution of impact craters on Venus – what are they telling us. *Journal of Geophysical Research*, 97, 13, 257–13, 301.
- SMREKAR, S.E., DAVAILLE, A., SOTIN, C. (2018): Venus Interior Structure and Dynamics. *Space Science Review*, 214, 88, 1–34.
- SPOHN, T., BREUER, D., JOHNSON, T.V. (2014): *Encyclopedia of the Solar System*. Third Edition. Elsevier, Amsterdam, Oxford, Massachusetts.
- STEVENSON, D.J. (2003): Planetary magnetic fields. *Earth and Planetary Science Letters*, 208, 1–11.
- TAYLOR, F.W., SVEDHEM, H., HEAD, J.W.III (2018): Venus: the atmosphere, climate, surface, interior and near-space environment of an Earth-like planet. *Space Science Review*, 214, 35, 1–36.
- VANÝSEK, V. (1980): *Základy astronomie a astrofyziky*, Academia, Praha.

YAZEV, S.A. (2011): Лекции о Солнечной системе: Учебное пособие. Лань, Санкт-Петербург, 57–75.

Elektronické zdroje

- [1] The rapest eclipse. Transit of Venus (2012): Why Is It Important?
<http://www.exploratorium.edu/venus/question4.html> (cit. 27. 2. 2019).
- [2] Astronomia (2010): Venuše, <http://astronomia.zcu.cz/planety/venuse/1913-venuse>
(cit. 27. 2. 2019)
- [3] NASA (1961): Sputnik 7 – Description,
<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1961-002A> (cit. 2. 3. 2019)
- [4] The Planetary Society: Missions to Venus and Mercury,
<http://www.planetary.org/explore/space-topics/space-missions/missions-to-venus-mercury.html#venera1> (cit. 2. 3. 2019)
- [5] NASA Jet Propulsion Laboratory (2015): NASA Selects Investigations for Future Key Planetary, <https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=4727> (cit. 2. 3. 2019)
- [6] Венера Д (2011): О проекте, <http://venera-d.cosmos.ru/index.php?id=658>
(cit. 2. 3. 2019)
- [7] Astronomia (2010): Venuše. Charakteristika,
<http://planety.astro.cz/venuse/1932-charakteristika> (cit. 5. 3. 2019)
- [8] Universe Today (2016): How fast does Venus Rotate?
<https://www.universetoday.com/36687/rotation-of-venus/> (cit. 7. 3. 2019)
- [9] NASA (2018): Venus Fact Sheet,
<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/venusfact.html> (cit. 7. 3. 2019)
- [10] NASA Reference Publication 1349 (2016): Twelve Year Planetary Ephemeris: 1995–2006, <https://eclipse.gsfc.nasa.gov/TYPE/venus2.html> (cit. 6. 3. 2019)
- [11] EarthSky (2017): Venus brightest around February 16, <https://earthsky.org/sky-archive/planet-venus-reaches-greatest-illuminated-extnet> (cit. 7. 3. 2019)
- [12] Astronomia (2013): Venuše. Trajektorie a Rotace, <http://planety.astro.cz/venuse/2402-trajektorie-a-rotace> (cit. 8. 3. 2019)
- [13] Encyclopedia Britannica (2019): Venus. The atmosphere,
<https://www.britannica.com/place/Venus-planet/The-atmosphere> (cit. 8. 3. 2019)
- [14] NASA Science, Solar System Exploration: Venus,
https://solarsystem.nasa.gov/planets/venus/in-depth/#structure_otp (cit. 9. 3. 2019)

- [15] Astronomia (2013): Venuše. Nitro, <http://planety.astro.cz/venuse/1926-nitro> (cit. 16. 3. 2019)
- [16] Astronomia (2013): Venuše. Atmosféra, <http://planety.astro.cz/venuse/1914-atmosfera> (cit. 4. 4. 2019)
- [17] Astronomia (2010): Venuše. Povrch, <http://planety.astro.cz/venuse/1915-povrch> (cit. 10. 4. 2019)
- [18] NASA. Jet Propulsion Laboratory (1966): Venus – Complex Network of Narrow Fractures Near Hestia Rupes Region, <https://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=PIA00469> (cit. 15. 4. 2019)
- [19] ESA. Venus Express (2015): How lava flows discovered on Venus, http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Venus_Express/Hot_lava_flows_discovered_on_Venus (cit. 25. 5. 2019)
- [20] Роскосмос (2019): «Венера-Д»: отчет по второму этапу работы, <https://www.roscosmos.ru/26234/> (cit. 7. 7. 2019)
- [21] Венера Д (2011): Научные задачи, <http://venera-d.cosmos.ru/index.php?id=676> (cit. 7. 7. 2019)
- [22] Российская Академия Наук, совет по космосу: Проект Венера-Глоб, <http://stp.cosmos.ru/index.php?id=1381> (cit. 7. 7. 2019)
- [23] NASA. Jet Propulsion Laboratory: The Venus Emissivity, Radio Science, InSAR, Topography, and Spectroscopy mission (VERITAS), <https://science.jpl.nasa.gov/projects/VERITAS/> (cit. 7. 7. 2019)
- [24] GLAZE, L.S., GARVIN, J.B., ROBERTSON, B., JOHNSON, N.M., AMATO, M.J., THOMPSON, J., GOODLOE, C., EVERETT, D. (2016): DAVINCI: Deep Atmosphere Venus Investigation of Noble gases, Chemistry, and Imaging, <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20170002022.pdf> (cit. 7. 7. 2019)

Příloha 1: Přehled historie průzkumu planety Venuše kosmickými sondami.

Mise	Stát	Start	Cíle mise	Výsledky
Sputnik 7	SSSR	4.2.1961	Vyslání první kosmické sondy k planetě Venuše	Nebyla dosažena potřebná trajektorie dráhy a sonda zůstala na oběžné dráze Země
Venera 1	SSSR	12.2.1961	Výzkum meziplanetárního prostoru a povrchu planety Venuše	První meziplanetární sonda, měření parametrů kosmického záření, následně ztraceno spojení se sondou
Mariner 1	USA	22.7.1962	Průzkum Venuše	Raketa byla krátce po startu zničena
Sputnik 19	SSSR	25.8.1962	Přistání na Venuši a následný průzkum jejího povrchu	Nebyla dosažena potřebná trajektorie dráhy a sonda zůstala na oběžné dráze Země
Mariner 2	USA	27.8.1962	Měření teploty atmosféry a magnetického pole Venuše (blízký přelet 14.12.1962)	Byla objevena povrchová teplota 428 °C, absence vodní páry ve složení atmosféry, absence magnetického pole kolem planety
Sputnik 20	SSSR	1.9.1962	Přistání na Venuši a následný průzkum povrchu planety	Nebyla dosažena potřebná trajektorie dráhy a sonda zůstala na oběžné dráze Země
Sputnik 21	SSSR	12.9.1962	Přeletová kosmická mise Venuše	Sonda byla zničena při explozi rakety
Venera 1964A	SSSR	19.2.1964	Přeletová kosmická mise Venuše	Nebyla dosažena oběžná dráha kolem Země
Venera 1964B	SSSR	1.3.1964	Přeletová kosmická mise Venuše	Nebyla dosažena oběžná dráha kolem Země
Cosmos 27	SSSR	27.3.1964	Přeletová kosmická mise Venuše	Nebyla dosažena potřebná trajektorie dráhy a sonda zůstala na oběžné dráze Země
Zond 1	SSSR	2.4.1964	Průzkum meziplanetárního prostoru a testování palubních systémů kosmické sondy	Spojení s kosmickou sondou bylo ztraceno
Venera 2	SSSR	12.11.1965	Průzkum planety Venuše	Byla zjištěna nová data o meziplanetárním prostoru, avšak údaje o Venuši nebyly přeneseny
Venera 3	SSSR	16.11.1965	Průzkum planety Venuše (přistání sondy 1.3.1966)	První kosmická sonda, která přistála na jiné planetě
Venera 4	SSSR	12.6.1967	Průzkum fyzikálních parametrů a chemického složení atmosféry Venuše (přistání 18.10.1967)	Bylo zjištěno, že atmosféra Venuše ze 90 % skládá z CO ₂ a procenta kyslíku a vodních par a dále, že planeta nemá radiační pásy ani silné magnetické pole a teplota se pohybuje v rozmezí 40 až 280 °C (u povrchu) a tlak mezi 15 až 22 barů

Mariner 5	USA	14.6.1967	Průzkum atmosféry, měření magnetického pole, odrazivosti radiových vln a emise UV záření (přistání 19.10.1967)	Zjištění povrchové teploty planety Venuše 267 °C
Cosmos 167	SSSR	17.6.1967	Přistání na Venuši a následný průzkum jejího povrchu	Nebyla dosažena potřebná trajektorie dráhy a sonda zůstala na oběžné dráze Země
Venera 6	SSSR	10.1.1969	Měření teploty, tlaku, složení atmosféry Venuše (přistání 17.5.1969)	Byly získány přesnější údaje o atmosféře, souvislosti změn tlaku a teploty; byla provedena měření teploty atmosféry: 25–320 °C; měření tlaku: 0,5–27 barů
Venera 7	SSSR	17.8.1970	Přistání na Venuši a následný průzkum jejího povrchu (přistání 15.12.1970)	Měření teplot atmosféry: 25-475 °C; zjištění povrchové teploty: 475±20 °C, povrchového tlaku: 90±15 barů a rychlosti větru: 2,5 m·s ⁻¹
Cosmos 359	SSSR	22.8.1970	Přeletová mise Venuše	Nebyla dosažena potřebná trajektorie dráhy a sonda zůstala na oběžné dráze Země
Venera 8	SSSR	27.3.1972	Přistání na Venuši a následný průzkum jejího povrchu (přistání 22.7.1972)	Byla provedena měření povrchové teploty planety: 470±8 °C, povrchového tlaku: 90±1,5 barů, rychlosti větru: 0-2 m/s (u povrchu), 50-60 m/s (v výšce 50 km); obsah amoniaku v atmosféře cca 0,01-0,1 %; byla objevena kyprá půda s hustotou 1,4 g/cm ³ a byly provedeny první analýzy o původu hornin
Cosmos 482	SSSR	31.3.1972	Přistání na Venuši a následný průzkum jejího povrchu	Nebyla dosažena potřebná trajektorie dráhy a sonda zůstala na oběžné dráze Země
Mariner 10	USA	3.11.1973	Přeletová mise Venuše (blízký přelet 5.2.1974)	Bylo získáno přibližně 3000 snímků planety v UV části spektra záření a v normálním režimu s rozlišením 90x18 metrů; byl objeven dynamický stav atmosféry, byla určena hmotnost planety a absence magnetického pole Venuše
Venera 9	SSSR	8.6.1975	Přistání na Venuši a následný průzkum jejího povrchu (přistání 22.10.1975)	Byly získány první snímky povrchu Venuše, včetně panoramatického snímku o 180°; byla objevena oblaka s mocností 30-40 km, atmosférické složky HCl, HF, Br, I; byla naměřena povrchová teplota 485 °C povrchový tlak 90 barů

Venera 10	SSSR	14.6.1975	Přistání na Venuši a následný průzkum jejího povrchu (přistání 23.10.1975)	Byly ověřeny a rozšířeny výsledky průzkumu Venery 9
Pioneer Venus 1	USA	20.5.1978	Komplexní průzkum a ověření údajů o atmosféře planety Venuše (přistání na oběžnou dráhu 4.12.1978)	Byla prozkoumána struktura horní atmosféry a ionosféry; dále celkový charakter atmosféry a povrchu planety. Byla studována interakce slunečního větru s ionosférou a slabým magnetickým polem Venuše
Pioneer Venus 2	USA	8.8.1978	Studium struktury a složení atmosféry a povrchu Venuše, radiačního pole, složení oblaků, výměny energie ve spodní atmosféře planety (přistání 9.12.1978)	Pokračování měření jako u sondy "Pioneer Venus 1" a studium souvislosti mezi lokálními měřeními a celkovým stavem planety Venuše
Venera 12	SSSR	14.9.1978	Průzkum gama záření Slunce; studium podrobného chemického složení atmosféry, původu oblaků, tepelné rovnováhy atmosféry, složení a vlastností povrchu Venuše (přistání 21.12.1978)	Byly objeveny důkazy existence blesků a hromu; měřen obsah síry a chloru v atmosféře a obsah CO v nižších výškách atmosféry Venuše
Venera 11	SSSR	9.9.1978	Průzkum planety Venuše a meziplanetárního prostoru (přistání 25.12.1978)	Byly objeveny další důkazy existence blesků a hromu a měřen obsahu CO v nižších výškách atmosféry Venuše
Venera 13	SSSR	30.10.1981	Průzkum atmosféry a povrchu planety Venuše (přistání 1.3.1982)	Byly pořízeny první barevné obrázky planety; byl odebrán vzorek půdy (a později zjištěno, že patří do skupiny alkalických gabroidů); byla naměřena povrchová teplota: 457 °C a povrchový tlak na Venuši, který je 84krát větší než u hladiny moře na Zemi
Venera 14	SSSR	4.11.1981	Průzkum atmosféry a povrchu planety Venuše (blízký přelet 04.11.1981 a přistání 5.3.1982)	Byla získána barevná panoramata povrchu Venuše; byl odebrán vzorek (a později zjištěno, že patří do skupiny tholeických bazaltů); byly identifikovány tři vrstvy oblaků
Venera 15	SSSR	2.6.1983	Zkoumání povrchu planety, včetně radarového mapování topografie Venuše (přistání 10.10.1983)	Byla vytvořena mapa povrchu Venuše pomocí jejího průzkumu radary

Venera 16	SSSR	7.6.1983	Radarové mapování povrchu planety Venuše (přistání 10.10.1983)	Další průzkum povrchu planety radary a doplnění dat mise "Venera 15"; byla vytvořena podrobná mapa povrchu Venuše
Vega 1	SSSR	15.12.1984	Studium pohybů, struktury a oblačnosti atmosféry, výzkumu povrchu a kůry Venuše (spouštění balonu 15.12.1984 a přistání 11.6.1985)	Byla provedena měření místní atmosférické dynamiky, tlaku, teploty, úrovně osvětlení povrchu a oblačnosti v průběhu 46 hodin
Vega 2	SSSR	21.12.1984	Studium pohybů, struktury a oblačnosti atmosféry; studium povrchu a kůry Venuše (spouštění balonu 21.12.1984 a přistání 15.6.1985)	Pokračování měření provedených při misi sonda Vega 1
Galileo	USA	18.10.1989	Průzkum planety Jupiter (blízký přelet Venuše 10.2.1990)	Bylo pořízeno 81 snímků oblačnosti planety Venuše
Magellan	USA	4.5.1989	Průzkum povrchu planety Venuše radary SAR, mapování jejího povrchu radary; získání blízkých a globálních radarových snímků povrchu s rozlišením 50x100 km; získání dat o gravitačním poli, vnitřní stavbě, struktuře planety (přistání na oběžnou dráhu 10.8.1990)	Byly získány radarové snímky s lepším rozlišením pro mapování 99 % povrchu Venuše, včetně snímků jižní polární oblasti, dále data pro stereofonní snímky povrchu, gravimetrické údaje pro 95 % planety, údaje o hustotě atmosféry v různých výškách
Venus Express	ESA	11.11.2005	Komplexní průzkum a ověření informace o atmosféře planety; studium plazmového prostředí a interakci horní atmosféry se slunečním větrem; zkoumání role skleníkového efektu při vytváření atmosféry; výzkum mechanismu super rotace v horní atmosféře; studium mechanismu tvorby oblačnosti v různých výškách (přistání na oběžnou dráhu 11.4.2006)	Byly získány snímky jižního pólu planety, měřeny hustoty horních vrstev atmosféry a byl zjištěn optický jev "glory". Glory je vysoce zkrasleným obrazem slunečního paprsku, které se odráží od kapek vody nebo jiných aerosolů v atmosféře, vzniká za příčinou procesu „wave tunneling“

Messenger	USA	3.8.2004	Průzkum planety Merkur (blízký přelet Venuše 24.10.2006 a blízký přelet Venuše 5.6.2007)	Bylo pořízeno několik set snímků planety Venuše a proveden studium její atmosféry spektrometrem
AKATSUKI	Japonsko	20.5.2010	Studium dynamiky horní atmosféry Venuše; výzkum mechanismu super rotace; pátrání po aktivních sopkách; měření teplot v atmosféře planety (přistání na oběžnou dráhu 7.12.2015)	Systematické snímkování planety ve spektru UV záření; byla objevena oblaka v atmosféře Venuše z kyseliny sírové