Вісник Астрономічної школи | Astronomical School's Report

ISSN 1607–2855

Том 10 • № 1 • 2014 С. 6 – 19

УДК 523.4

Дослідження планет земного типу космічними апаратами

А.П. Відьмаченко, О.В. Мороженко

Головна астрономічна обсерваторія НАН України

Сонячна система складається із Сонця, великих (класичних), карликових, малих планет та їх супутників, комет, метеороїдів, дрібних метеоритних частинок і пилинок. Вісім класичних планет поділяють на планети земного типу (Меркурій, Венера, Земля, Марс) і планети-гіганти (Юпітер, Сатурн, Уран, Нептун). Основними складовими атмосфер планет земного типу є азот і вуглекислий газ. Процес утворення планет земної групи детально простежений, розраховані відстані між планетами, їхні маси, період обертання навколо Сонця, нахили осі задовільно погоджуються зі спостереженнями. Вони мають багато спільного: невеликі розміри й маса, середня густина в кілька разів більша за густину води, повільне обертання навколо осі, мала кількість супутників чи їх відсутність, тверда поверхня тощо. На Венері, Землі й Марсі є вулкани, а в поверхневих шарах усіх чотирьох планет більшою або меншою мірою збереглися сліди тектонічної діяльності (процеси горотворення) та інтенсивного метеоритного бомбардування як одного з основних факторів формування поверхні Марса і Меркурія. На Землі метеоритні кратери майже цілком стерті тектонічними та ерозійними процесами, тоді як на Венері вони збереглися набагато краще.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАНЕТ ЗЕМНОГО ТИПА КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ, Видьмаченко А.П. Мороженко А.В. — Солнечная система состоит из Солнца, больших (классических), карликовых, малых планет и их спутников, комет, метеороидов, мелких метеоритных частиц и пылинок. Восемь классических планет разделяют на планеты земного типа (Меркурий, Венера, Земля, Марс) и планеты-гиганты (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун). Основными составляющими атмосфер планет земного типа являются азот и углекислый газ. Процесс их образования прослежен достаточно подробно, рассчитаны расстояния между планетами, их массы, период обращения вокруг Солнца, наклоны оси удовлетворительно соглашаются с наблюдательными данными. Планеты земной группы имеют много общего: небольшие размеры и масса, средняя плотность в несколько раз больше плотности воды, медленное вращение вокруг оси, малое количество спутников или их отсутствие, твердая поверхность и т.п. На Венере, Земле и Марсе есть вулканы, а в поверхностных слоях всех четырех планет в большей или меньшей степени сохранились следы тектонической деятельности (процессов горообразования) и интенсивной метеоритной бомбардировки как одного из основных факторов формирования поверхности Марса и Меркурия. На Земле метеоритные кратеры почти целиком стерты тектоническими и эрозионными процессами, тогда как на Венере они сохранились гораздо лучше.

THE STUDY EARTH-LIKE PLANETS USING SPACECRAFT, by Vidmachenko A.P., Morozhenko O.V. — The Solar system consists of the Sun, large (classical), dwarf, small planets and their satellites, comets, meteoroids, small meteoritic particles and dust grains. The eight classical planets are divided into terrestrial planets (Mercury, Venus, Earth, Mars) and giant planets (Jupiter, Saturn, Uranus, Neptune). The main components of the Earth-like planets atmospheres are nitrogen and carbon dioxide. The formation of the terrestrial planets' traced in some detail, calculated the distance between the planets, their mass, orbital period around the Sun, the inclination of the axis satisfactorily agree with observational data. Terrestrial planets have much in common: small size and weight, the average density is several times greater than the density of water, slow rotation around its axis, few satellites or lack thereof, hard surface and so on. There are volcanoes on Venus, Earth and Mars, and in the surface layers of all four planets more or less traces of tectonic activity (mountain building processes) and intense meteorite bombardment as one of the main factors of the Mars and Mercury surface formation. On Earth meteor crater almost completely obliterated by tectonic and erosional processes while they survived much better on Venus.

Ключевые слова: планеты земного типа; внутреннее строение планет; космический аппарат.

Key words: Earth-like planets; internal structure of planets; spacecraft.

1. ВСТУП

У Сонячній системі є (рис. 1) Сонце, оточуючі його великі (класичні), карликові і малі планети та їх супутники, комети, метеороїди і незліченна кількість дрібних метеоритних частинок і пилинок. Вісім класичних планет поділяють на планети земного типу (Меркурій, Венера, Земля, Марс) і планети-гіганти (Юпітер, Сатурн, Уран, Нептун). Характерною особливістю перших є наявність твердого ядра і відносно малопотужної атмосфери (за винятком Меркурія) та велика середня густина $(4-5{,}5)$ г/см^3, других — надзвичайно потужна атмосфера і дуже низька середня густина $(0{,}7-1{,}6)$ г/см^3. Основними складовими атмосфер планет земного типу є азот і вуглекислий газ, планет-гігантів — водень і гелій.

За новим визначенням, *планетою вважається тіло, яке задовольняє двом умовам: воно знаходиться на орбіті навколо зірки (але не є її компаньйонкою) і має таку велику масу, що під час формування набуває форму сфери*. Цим умовам відповідають тіла масою більше $5\cdot10^{20}$ кг і діаметром більше ≈ 800 км.

2. ПРОЦЕС УТВОРЕННЯ ПЛАНЕТ ЗЕМНОГО ТИПУ І ОСОБЛИВОСТІ ЇХ ВНУТРІШНЬОЇ БУДОВИ

Останніми роками вдалося виконати трудомісткі розрахунки динаміки рою тіл у зоні утворення планет земної групи, котрі підтвердили як характер розподілу швидкості на заключному етапі росту планет, так і час акумуляції Землі ($\sim 10^8$ років), які раніше оцінювалися лише аналітичними методами. Процес утворення планет земної групи простежений зараз досить детально, а розраховані відстані між планетами, їхні маси, період обертання навколо Сонця, нахил осей задовільно погоджуються зі спостережними даними.

Внутрішню будову планет земного типу тривалий час пояснювала гіпотеза *гомогенної акреції* О.Шмідта, згідно з якою ядра повинні були утворюватися не в момент зародження самої планети, а дещо пізніше в процесі диференціації речовини, зумовленої нагріванням надр планет, де джерелами тепла були акреція, радіоактивний розпад, гравітаційне стискування тощо. Пізніше А.Виноградов з колегами розробили модель *гетерогенної акреції*, згідно з якою планета утворювалась в міру конденсації окремих хімічних елементів та їхніх сполук. У такому разі залізне ядро мало б утворитися на самому початку утворення планетезималі в результаті акреції сконденсованих крапель залізонікелю, на яке пізніше осаджувалась силікатна мантія, яка захищала ядро від можливих реакцій з H_2S і водою. На користь гетерогенної акреції свідчить і те, що досить добре досліджена глибинна стратифікація Землі збігається саме з таким порядком конденсації елементів та їхніх сполук.

В залежності від початкових умов на планетезималях, які різняться за розмірами, хімічним складом, температурою тощо, зрештою виникли певні відмінності у внутрішній будові планет і в першу чергу — у розмірі та хімічному складі ядра, мантії та кори. Ряд опосередкованих даних вказують на наявність у Меркурія масивного залізного ядра розміром більше 74% його радіуса (1800–1900 км), яке складає $\sim$65% маси планети, оточеного силікатною оболонкою 500–600 км завтовшки. Середня густина речовини Меркурія складає 5,43 г/см^3. Є три основні теорії такої внутрішньої будови, які базуються на різному мінералогічному складі його поверхні. Одна з гіпотез випливає із сучасної теорії утворення планет, згідно з якою, в допланетній пиловій хмарі температура прилеглої до Сонця області була вищою, ніж в її окраїнних частинах, тому легші хімічні елементи виносилися у віддалені та холодніші її області, що зумовлювало накопичення в навколосонячній області (там, де зараз розташований Меркурій) надлишку важчих елементів, найпоширенішим з яких є залізо. Інші пояснення пов'язують високу щільність Меркурія з хімічним відновленням оксидів легких елементів до їх важчої (металевої) форми під дією потужної сонячної радіації та з поступовим випаровуванням і виносом у космос зовнішнього шару первісної кори планети під впливом сонячного нагрівання; вважають також, що значна частина «кам'яної» оболонки Меркурія була втрачена в результаті вибухів і викидів речовини в космічний простір при зіткненнях з небесними тілами менших розмірів, наприклад, астероїдами.

Стосовно структури поверхневого шару також існують різні гіпотези. Одна з них виходить з того, що на ранній стадії розвитку Меркурія охолодження зумовлювало зменшення його об'єму, а тому кам'яна оболонка, яка охолола і затверділа раніше, стискувалася і розтріскувалася, а краї тріщин наповзали один на одного та утворювали своєрідну луску. Сліди таких рухів на поверхні Меркурія мають вигляд уступів висотою в кілька кілометрів, звивистої форми і довжиною в сотні кілометрів, а верхній шар нагадує застиглу кам'яну хвилю. Інша гіпотеза пов'язана з тим, що невдовзі після утворення внаслідок потужного бомбардування планетезималями Меркурій був практично позбавлений первинної кори і навіть верхньої мантії. Ця ідея передбачає, що сучасна поверхня має складатися з порід, в яких міститься дуже мало елементів, раніше сконцентрованих в первинній корі (кремнію, алюмінію і кисню). Відповідно до найрозповсюдженішої моделі, побудованої за даними визначення маси, середньої густини, безрозмірного моменту інерції, а також лабораторних досліджень стану речовини при високому тиску і температурі,

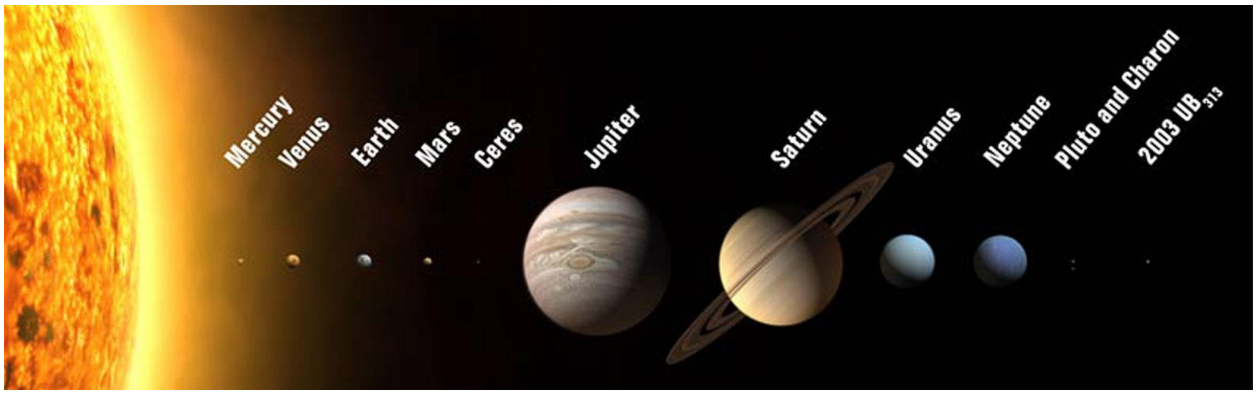

Рис. 1. Найбільші тіла у Сонячній системі

Меркурій є двошаровим і складається з гарячого залізонікелевого ядра, яке поступово охолоджується, та силікатної оболонки (літосфери), температура на розділі яких може сягати 1000 К. Невелике магнітне поле планети свідчить про рідке розплавлене ядро, у породах якого міститься близько 6% заліза, алюміній і кальцій.

Венера, як і Земля, має оболонкову будову: кора близько 30 км завтовшки, мантія і ядро. Моделі її будови припускають наявність частково розплавлених порід на глибинах від 250 до 500 км і досить твердої нижньої мантії. Через дуже повільне осьове обертання є вказівки на можливу відсутність у цієї планети подібного до земного зовнішнього ядра з властивостями рідини. Первинна кора Венери відповідає базальтовому типу, хоча місцями її склад може бути різноманітнішим (аж до гранітоїдів). Вважають, що більше 500 млн. років тому Венера зазнала інтенсивної деформації з утворенням так званих тессер, які проявляються окремими плямами. За наявними спостережними даними запропоновано кілька моделей внутрішньої будови Венери. Найпоширенішою є тришарова: ядро, нижня і верхня мантії та силікатна кора понад 16 км завтовшки. Мантія є оболонкою з твердих порід, що простягається на глибину ~ 3300 км до границі із залізним ядром. На саме ядро припадає приблизно 12% маси планети (нагадаємо, що для Землі $\sim 16\%$), яке ймовірно складається з розплавленого заліза і нікелю. Не виключено, що кора Венери (літосфера) в 2–3 рази товстіша за земну, оскільки вона витримує досить високі та великі за площею гори.

Марс має хімічний склад типовий для планет земної групи, хоча існують і специфічні відмінності. Під впливом гравітації тут відбувався перерозподіл речовини. На це, зокрема, вказують сліди магматичної діяльності. Очевидно, що ядро багате на залізо та сірку, які при характерній температурі в 1300–1500 К перебувають в рідкому стані та є електропровідними. Радіус ядра становить 800–1000 км, а маса — близько 9–10% маси планети. Відповідно до сучасних уявлень, ядро формувалося близько мільярда років і це співпало з раннім вулканізмом. Майже стільки ж тривав і період часткового плавлення силікатів у мантії, який супроводжувався інтенсивними вулканізмом і тектонікою і завершився близько 3 млрд. років тому. Принаймні протягом мільярда років на Марсі тривали глобальні тектонічні процеси, внаслідок яких виникли величезні вулкани. Мантія Марса збагачена сульфатом заліза, значну кількість якого виявлено в досліджених поверхневих породах. Але його вміст все ж помітно менший, ніж на інших планетах земної групи. Товщина літосфери Марса сягає кількох сотень кілометрів. Кора багата на олівін і оксид заліза, які і надають планеті «іржавого кольору». Високий вміст гідроксидів заліза в ґрунті є важливим свідченням опускання важких елементів і порід до ядра планети, тобто відбувалася гравітаційна диференціація Марса, яка сильно затягнулася в часі й була виражена набагато слабкіше, ніж на Землі. Холодний зовнішній шар Марса можна розглядати як непряму вказівку на те, що спочатку Марс пройшов стадію «океан магми», коли сталося помітне збіднiння вмісту мантії радіоактивними джерелами тепла через їх винос у кору. Будова зовнішніх шарів кори Марса не є горизонтально однорідною. З аналізу результатів місії «Марс Пасфайндер» було зроблено висновок про подібність раннього Марсу до Землі. Деякі матеріали кори Марсу за вмістом кремнезему можуть бути подібними до континентальної кори Землі.

Як видно, планети земного типу складаються із щільного та багатого на залізо ядра, оточеного мантією з магнію і силікатів (скельних порід), а верхні шари кори сформувалися або з остиглих матеріалів при диференціації всього об'єму на ранній стадії історії планет, або при пізнішому підйомі з надр розплавлених складових мантії. Отже, густина кожної планети відображає баланс збагаченого залізом основного ядра і збагачених силікатами мантії і кори. Планети земної групи майже цілком складаються з мінералів (головним чином з оксидів кремнію, алюмінію, заліза, кальцію, магнію, натрію і калію), які зустрічаються у вигляді кристалів, сумішей і складних форм. Якщо маса планети земної групи менше певного критичного діапазону мас, то планета майже цілком складається з нелетких складових.

В характеристиках планет земної групи є багато спільного: невеликі розміри й маса та середня густина в кілька разів більша за густину води; повільне обертання навколо своїх осей; мала кількість супутників чи їх відсутність; тверді тіла, майже вся речовина яких зосереджена у літосфері. Очевидно, що в їхніх надрах існує хімічна диференціація: важкі елементи (зокрема, Fe) концентруються біля центра; легші і водночас більш легкоплавкі — у зовнішніх оболонках; кора і мантія складаються із силікатних порід та не виключено, що всі вони мають рідке ядро. На Венері, Землі і Марсі є вулкани, а в поверхневих шарах усіх чотирьох планет більшою або меншою мірою збереглися сліди тектонічної діяльності (процесів горотворення) та інтенсивного метеоритного бомбардування як одного з основних факторів формування поверхні Марса і Меркурія. На Землі метеоритні кратери майже цілком стерті тектонічними та ерозійними процесами, тоді як на Венері вони могли зберегтися набагато краще.

3. ДОСЛІДЖЕННЯ МАРСУ КОСМІЧНИМИ АПАРАТАМИ

Починаючи з 1960-х років усе вагомішу інформацію про Марс стали давати космічні апарати (КА). 01.11.1962 р. до Марса відправили КА «Марс-1», але зв'язок з ним було втрачено на підльоті до планети.

Після того спочатку США та СРСР, а з 2003 р. і Європейське співтовариство провели багато успішних польотів, перелік яких наведено нижче.

КА «Маринер-4» вперше 15 липня 1965 р. пролетів мимо Марса на відстані 13 200 км. На борту було встановлено: 1) 4 детектори для реєстрації частинок низьких енергій і деякі з них показали перевищення відліку над фоном, приписаного потоку сонячних протонів. Припустивши, що фронти ударної хвилі сонячного вітру та магнітопаузи у Марса і Землі однакові, магнітний диполь Марса було оцінено приблизно в $5 \cdot 10^{-5}$ земного. 2) Телескоп для реєстрації заряджених частинок з трьома детекторами електронів з енергією більше 40 КеВ (не було зареєстровано), протонів та α-частинок з енергією від 1 до 170 МеВ/нуклон (виявлено збільшену концентрацію протонів). При заході КА за лімб вперше було проведено експеримент з радіозатемнення, де було зареєстровано ослаблення радіосигналу та зміна його фази, що використали для визначення атмосферного тиску, радіуса планети та характеристик іоносфери. Отримано 22 зображення Марса, які перекрили приблизно 1% його поверхні та вказали на подібність структури поверхневих шарів Марса і Місяця. Знайдено 70 кратерів діаметром від 5 до 120 км та не виявлено каналів.

КА «Маринер-6» та **КА «Маринер-7»** пролетіли на мінімальній відстані від планети в першій декаді червня та третій декаді серпня 1969 р. На їх борту була встановлена ідентична апаратура: 1) дві телевізійні (ТВ) камери: ширококутна включилася на підльоті до Марса та робила знімки через світлофільтри на голубу, зелену та червону ділянки спектра із середньою роздільною здатністю приблизно в 24 км; на одному з них на площі в 625 000 км^2 було виявлено 156 кратерів різного розміру; при максимальному зближенні включилась друга камера, яка вела зйомку лише в жовтих променях з роздільною здатністю приблизно в 270 м; на знімках було виявлено кратери діаметром близько 300 м. Загалом було передано приблизно 200 ТВ зображень. 2) Інфрачервоні (ІЧ) спектрометри на ділянку спектра 1,9–14,3 мкм, за даними яких про інтенсивність смуги поглинання вуглекислого газу при довжині хвилі 2 мкм вивчався перепад тиску (висоти) над різними деталями диска (роздільна здатність 130×8 км, похибка по висоті ± 1 км). 3) ІЧ радіометри з полем зору 7° при λ 8,2–12,4 мкм та 18–25 мкм, спарені з ТВ камерами. Визначено, що при перетині границі південної полярної шапки (рис. 2) на широті $-61°$ температура там упала до 153 К. 4) УФ спектрометр на діапазон спектра 110–340 нм. 5) Апаратура для проведення експериментів по радіозатемненню та бістатичну радіолокацію.

КА «Маринер-9» досяг Марса 14 листопада 1971 р. і вперше став його штучним супутником з періодом обертання 12^h34^m і нахилом орбіти до екватора під кутом $64°24'$. Це дозволило вести дослідження всієї поверхні Марса за допомогою такої апаратури: 1) ТВ камера для передачі великомасштабних зображень; 2) Фур'є-спектрометр на ділянку спектра 5–50 мкм з номінальною роздільною здатністю 2,4 см$^{-1}$; 3) УФ спектрометр на ділянку спектра 110–340 нм; 4) апаратура для експериментів з радіозатемнення, результати аналізу яких вказали на великий перепад висоти окремих деталей, а граничні значення відповідали атмосферному тиску 2,8 та 10,3 мбар; 5) ІЧ радіометри, зцентровані на довжину хвиль 10 та 20 мкм, та давали просторову роздільну здатність приблизно в 20 км.

КА «Марс-2» та **«Марс-3»** досягли Марса 27 листопада та 2 грудня 1971 р. та стали його штучними супутниками з періодом обертаннями та нахилом орбіт 17^h56^m, $47°58'$ та $12^d16^h31^m$, $62°11'$. При підльоті цих апаратів від них відділилися капсули. Капсула КА «Марс-2» доставила на поверхню вимпел із зображенням герба СРСР, а капсула КА «Марс-3» вперше здійснила м'яку посадку в місці з координатами 45° пд.ш. і 158° сх.д. В перші секунди посадки на Землю були передані кілька рядків ТВ сигналу, а потім зв'язок обірвався. На орбітальних станціях цих апаратів була така апаратура: ТВ камера; ІЧ радіометр на інтервал довжини хвиль 8–40 мкм; радіотелескоп на довжину хвилі 3,5 см; чотири фотометри, які за допомогою світлофільтрів різної ширини отримували інформацію на довжині

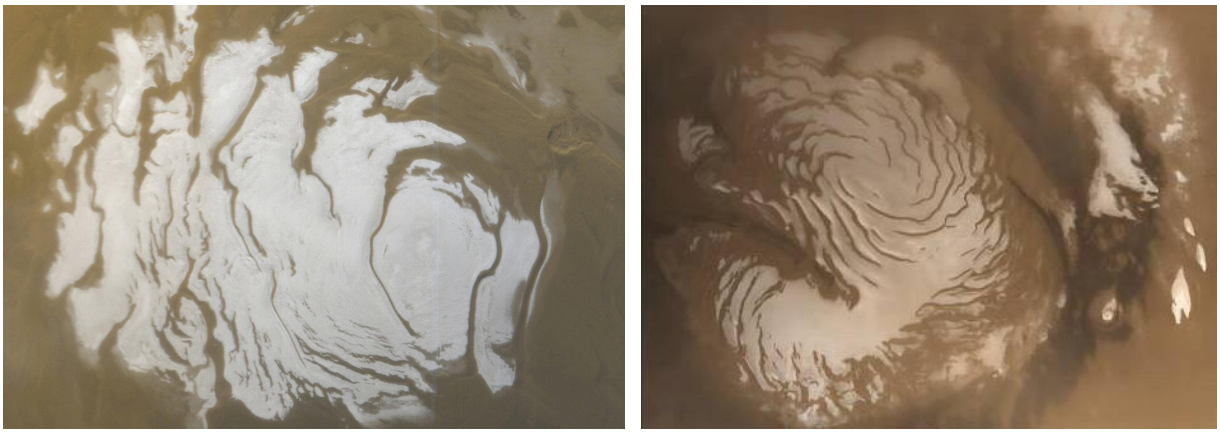

Рис. 2. Південна (ліворуч) і північна (праворуч) полярні шапки за даними КА «Марс Глобал Сервейєр»

хвиль 2 мкм (смуги поглинання вуглекислого газу), 1,38 мкм (водяна пара), 690, 560, 490, 420, 370 і 121,5 нм (лінія водню Лайман-альфа); магнітометр; іонні пастки та вузьконаправлений електростатичний аналізатор; радіокомплекс.

КА «Марс-4» 10 лютого 1974 р. пролетів мимо планети на відстані 2200 км та передавав зображення з прольотної траєкторії. **«Марс-5»** вийшов на орбіту Марса 12 лютого 1974 р. та став його штучним супутником з періодом обертання 24^h53^m та нахилом орбіти до екватора під кутом $62°11'$. Орбіта була вибрана так, щоб апарат проходив вдень над районом, куди мали опустити зонди наступні два КА. Першим досяг Марса КА «Марс-7» 9 березня 1974 р., але пройшов на висоті 1300 км над поверхнею. «Марс-6» досяг Марса 12 березня та опустив зонд в місці з широтою 24° пд. ш. та довготою 25° сх. д. Він уперше провів такі експерименти на трасі спуску та безпосередньо на поверхні з визначення: хімічного складу атмосфери, атмосферного тиску та температури біля поверхні; температурного градієнта; висоти тропопаузи. Окрім наукової апаратури на КА «Марс-3», на «Марс-5» були скануючий ТВ фотометр, фотометр на смугу озону 260 нм, два фотополяриметри на 9 довжин хвиль, спектрометр на ділянку спектра 300–800 нм та лічильник космічних променів.

КА «Вікінг-1» (В1) та **«Вікінг-2»** (В2) вийшли на орбіту Марса 19 червня та 7 серпня 1976 р. з періодом обертання 24^h40^m і 27^h20^m та нахилом орбіти до екватора під кутом $37°38'$ та 55°. Оскільки основною метою цих місій була м'яка посадка довго працюючих модулів В1 та В2, то тривалий час, базуючись вже на інформації, отримуваній безпосередньо з їх орбітальних станцій, уточнювалось місце посадки. Лише 20 липня та 3 серпня 1976 р. зонди В1 та В2 здійснили посадку в місцях з координатами: широта +22,27°, довгота 47,94° (В1) та +47,67°, 225,71° (В2). Для кожного апарату вибирали основне й запасне місце посадки за даними наземних РЛ спостережень в протистояння 1975–1976 рр. та ТВ зображень КА «Маринер-9». За даними РЛ спостережень визначався середньоквадратичний нахил (3–6°) нерівностей поверхні розміром від 1 до 1000 довжин хвиль з ефективним розміром 25 м. Остаточний вибір було зроблено вже в липні 1976 р. за даними аналізу ТВ зображень з орбітальних апаратів «Вікінг-1» та «Вікінг-2». Орбітальні модулі були оснащені традиційними приладами, а на посадочних модулях були встановлені прилади для оптичних досліджень довкілля навколо модулів, спостереження Сонця та супутників Марса, дослідження сейсмічної активності, намагніченої активності ґрунту, хімічного аналізу атмосфери та ґрунту, температури, тиску, швидкості та напрямку вітру тощо. Упродовж всієї місії сейсмометр працював приблизно 2100 годин, але сейсмічної активності не виявив.

КА «Фобос-1», «Фобос-2» були запущені 7 та 12 липня 1988 р. Їх основною задачею була м'яка посадка на супутник Марса Фобос, але при корекції траєкторії КА «Фобос-1» 28 серпня було подано помилкову команду, внаслідок чого відключилася система орієнтації і зв'язок з ним було втрачено. Водночас КА «Фобос-2» успішно досяг Марса 29 січня 1989 р. і став його супутником. Після корекції 18 лютого 1989 р. орбіта КА стала практично коловою та близькою до орбіти Фобоса. Після кількох корекцій 21 березня КА був переведений на орбіту, синхронну до орбіти Фобоса, але практично на кінцевому етапі (вже після проведених зйомок Фобоса) 27 березня зв'язок з цим КА також був утрачений, а тому м'яка посадка не відбулася. КА були оснащені приладами для дослідження навколишнього середовища і безпосередньо Марса та Фобоса: три ІЧ прилади (радіоспектрометр КРФМ в складі спектрометра зі спектральною роздільною здатністю 50 нм при λ 300–900 нм та радіометри на 5–67 мкм; спектрометр ІСМ на 0,8–3,5 мкм з роздільною здатністю 20 нм; скануючий радіометр ТЕРМОСКАН на спектральний діапазон 8,5–12 мкм та 600–950 нм); відеоспектрометричний комплекс (ТВ камера на 400–600, 800–1100 та 400–1100 нм та спектрометр з 36 спектральними каналами в діапазоні довжини хвиль 500–1000 нм); спектрометром оптичного випромінювання ІСО на λ 0,255, 0,760, 0,950 та 3,7 мкм; УФ спектрометр СУФР на λ 0,3–2,5, 0,3–12, 121,6 та 130 нм; сцинтиляційний гама-спектрометр; мас-аналізатор вторинних іонів ДИОН; магнітометри МАГМА, ФГММ та інші. Дублювання спектральних інтервалів в різних спостережних комплексах зумовлений тим, що в їх розробці брали участь різні країни.

КА «Пасфайндер», який у пам'ять К.Сагана було названо «Sagan Memorial Station», 4 липня 1997 р. здійснив посадку на Марс в місці з координатами: широта +19,33°, довгота 33,553° та випустив малий марсохід, названий «Sojourner». З його допомогою проводились експерименти з передачі зображень довкілля за допомогою камери (IMP), вивчення хімічного складу поверхневого шару із застосуванням спектрометрії α-протонів та рентгенівських променів; атмосферно-метеорологічні спостереження та технологічні експерименти.

КА «Марс Глобал Сервейєр» досяг Марса 11 вересня 1997 р. та став його супутником. КА був оснащений широко- та вузькокутовими камерами, тепловим спектрометром, лазерним дальноміром, радіоапаратурою, двома магнітометрами, електронним відбивачем.

КА «Марс Одіссей» досяг Марса 24 жовтня 2001 р., став його супутником та опустив зонд у північний полярний район.

Японська міжпланетна станція **«Nozomi»** («Надія») у 2003 р. наблизилася до Марса, але вийти на його орбіту не змогла, пролетівши на відстані 1000 км від поверхні планети.

КА «Марс Експрес» Європейського космічного агентства досяг Марса 19 грудня 2003 р., став його супутником та опустив британський модуль «Beagle 2» в приекваторіальний район Icidias Planitia. На жаль, зв'язок з ним був втрачений. Проте на переданому на початку лютого 2006 р. орбітальним модулем «Марс Експрес» зображенні дна кратера діаметром 35 км та глибиною 2 км на рівнині Vastitas Borealis (Північна Пустеля н широті 70° пн.ш.) було виявлено доволі чистий круглий крижаний диск (рис. 3), а на внутрішній стороні кратера у верхній правій частині було видно іній.

Два КА-близнюки **«Mars Exploration Rover»** («Ровер для дослідження Марса») з марсоходами **«Спіріт»** («Дух») і **«Оппорт'юніті»** («Можливість») на борту, які 3 та 23 січня 2004 р. опустились на протилежні боки планети. В середині спеціального кокона була металева платформа зі складною конструкцією з шістьма колесами — по три з кожного боку. Так почалася марсіанська одіссея двох роботів-всюдиходів, метою яких був пошук відповіді на запитання: «Чи є вода на Марсі?».

На особливу увагу заслуговують дослідження поверхні планети з марсоходів, вперше зроблених з апарату «Спіріт», який досліджував виступ гірських порід біля підніжжя Колумбійських гір, названих на честь загиблого у жовтні 2004 р. космічного корабля. Марсохід «Оппорт'юніті» виявив нові можливі ознаки слідів води, свідченням чого є характер тріщин на відкритій незвичній скелі Ешер (Escher, рис. 4) і темні зазубрені вертикальні пластин, розташовані на краю виступу основної породи (рис. 5).

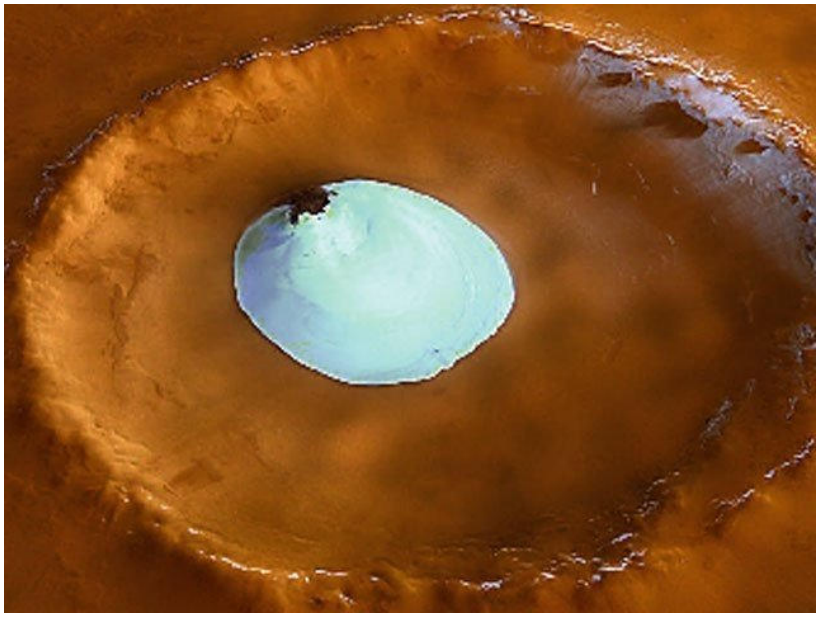

Рис. 3. Поклади водяної криги на поверхні Марса

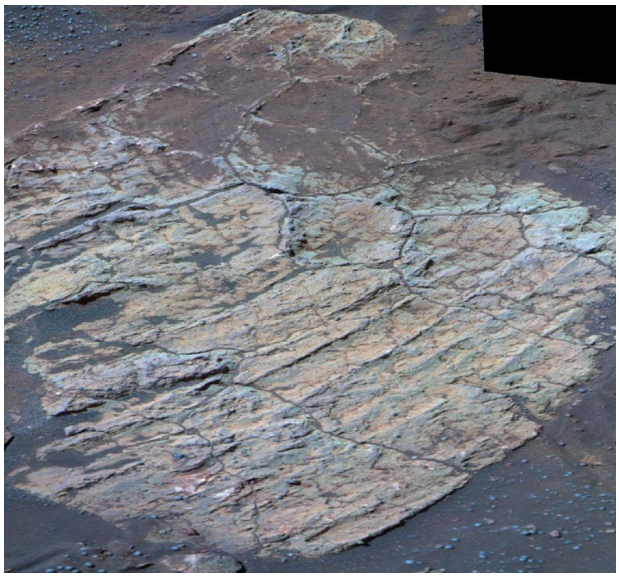

Рис. 4. Знімок з марсохода «Оппорт'юніті»: тріщини у скелі Ешер (Escher)

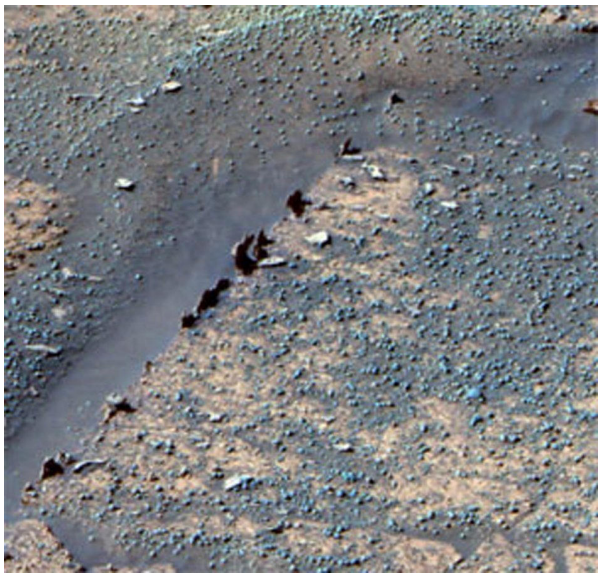

Рис. 5. Знімок з марсохода «Оппорт'юніті»: смуга тонких темних зазубрених вертикальних пластин на краю виступу основної породи

У першому випадку припустили, що породи зазнавали тривалої дії води, а в другому що виступ утворений шаром породи, який з'явився внаслідок розтріскування старіших шарів каменю й багата на мінерали вода почала просочуватися крізь тріщини, залишаючи мінеральні поклади, з яких утворилася міцніша за навколишній камінь порода, яка після ерозії довкілля залишилася у вигляді вертикальних «зубців». На цих фотографіях видно численні свідчення присутності води в минулому: незвичайні мінерали, порожнини, що залишилися після розчинення солей, гематитові сферичні кульки тощо. Спостережні дані показали, що в кратері Ендюренс такі ознаки трапляються приблизно у п'яти геологічних шарах. Такі знахідки свідчать про набагато триваліший період присутності води на поверхні планети, тому що для їх утворення обов'язкова вода. До того ж, аби поклади спресувалися в тверду речовину, а не кришилися, потрібен тривалий час. Визначений за даними спектрометрії з марсоходів «Спіріт» і «Оппорт'юніті» склад різних сполук заліза на поверхні Марса також вказав на можливу наявність води в минулому. Вперше було виявлено карбонати, які входять до складу восьмидесяти мінералів на Землі і складають близько 2% її маси, та які утворюються лише за наявності води й вуглекислого газу, це також підкріпило гіпотезу, за якою в далекому минулому на Марсі мали бути великі запаси рідкої води. Аналіз зразків каменю «Ель Капітан» (El Capitan) виявив сульфати й мінерали, які могли утворитися лише в присутності води. Пізніше подібне відкриття зробив марсохід «Спіріт», який просвердлив камінь «Хемфрі» (Humphrey) і виявив там порожнини, що могли утворитися лише під дією води, а в самих порожнинах знайшов поклади мінералів, які також можуть утворюватися лише в присутності води.

«**Mars Reconnaissance Orbiter**» («Орбітальний розвідник Марса») досяг Марса у березні 2006 р. і ще кілька місяців гальмувався у верхніх шарах марсіанської атмосфери для переходу на потрібну орбіту. На ньому було обладнання для детального дослідження поверхні планети у видимих та ІЧ променях для пошуку районів можливої посадки майбутніх експедицій і забезпечення радіозв'язку майбутніх спускних апаратів із Землею, а також пошук районів водної або геотермальної активності та проведення атмосферних і кліматичних досліджень. Цікавий проект зондування за допомогою радіолокатора SSR (Subsurface Sounding Radar) ґрунту на глибину до 1 км для виявлення рідкої води чи льоду.

Досить вагомі докази існування води на Марсі дав аналіз одних і тих самих ділянок поверхневого шару на зображеннях, отриманих КА «Марс глобал сервейєр» та «Марс реконнейсенс орбітер» у 1999, 2001 та 2004, 2005 рр. (рис. 6), який виявив зміни, що могли бути зумовлені лише рідиною. Було виявлено промоїни на підсонячних схилах долин і кратерів, де спостерігалися яскраво забарвлені відкладення, яких не було раніше та які можливо є гряззю, сіллю або інеєм, залишеним потоками рідини.

Це означає, що Марс є геологічно активнішим, ніж раніше вважалося, та що активність потоків зосереджена в середніх широтах, а знайдені структури не старші кількох десятків чи навіть одиниць років і нагадують сліди рідини, що просочується з-під кори вічної мерзлоти. Характерно, що всі сліди

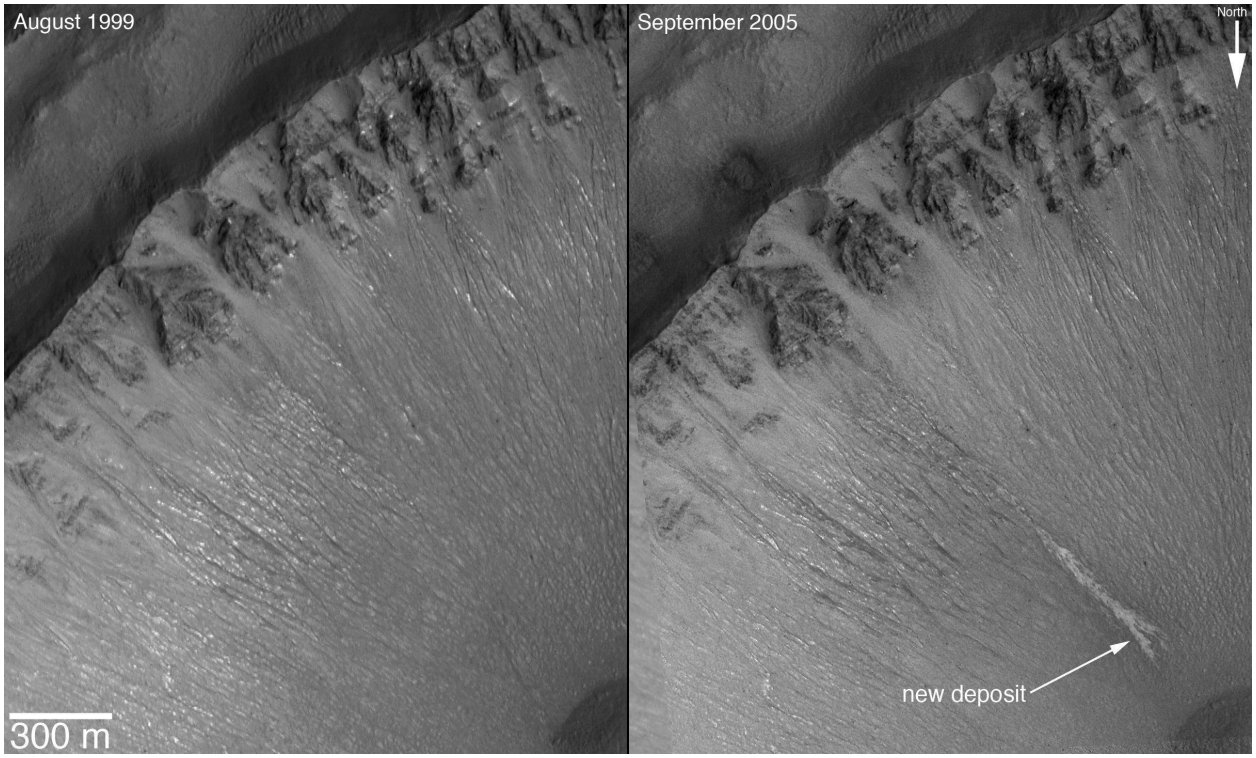

Рис. 6. Алювіальні потоки на схилах безіменного кратера в області Землі Сирен (Terra Sirenum), що мали місце у проміжок часу між серпнем 1999 р. (ліворуч) і вереснем 2005 р. (праворуч)

водно-селевої ерозії були виявлені на північних схилах глибоких каньйонів у північній півкулі і на південних схилах у південній півкулі, де атмосферний тиск хоч і ненадовго, але дозволяє зберегти воду від моментального холодного закипання. Вважають, що вода просочилася з тріщин, які виникли після падіння метеорита, що пробив один із численних підземних резервуарів. Кількість води, що встигла пройти сотні метрів, була еквівалентною об'єму води приблизно у 5–6 стандартних плавальних басейнах.

Зараз є свідчення, що рідка вода могла відігравати помітну роль у формуванні деяких із знайдених на схилах кратерів, плато та інших депресій утворень, подібних до водотоків. Ці канали утворені стіканням забрудненої рідини (селю) схилом униз від області просочування. Еродовані утворення на рис. 7 є прикладом багатьох водотоків на обриві рівнинного плато. Як видно, в шарі, з якого вони виходять, є виступ нижче твердішого шару скелі. У місці порівняно більших водотоків утворилися більші осипання. Нижче можливого водоносного шару помітні темні вузькі канали, по яких, можливо, і сходили селі, які можуть бути наслідком просочування води з ґрунту, яка рухалася по схилу донизу зовсім недавно. На користь останнього свідчить те, що досить помітний контраст між темними й світлими областями навряд чи міг зберігатися на Марсі тривалий час, тому що пил досить швидко укрив би темнішу поверхню і це зменшило б відмінність у яскравості. Такий аналіз дозволяє припустити, що показана на цьому знімку область лише кілька років тому зазнала водної ерозії через просочування води. Товщина такого водоносного шару у цій ділянці Марса не перевищує 200 м. А те, що ні в дюнах, ні в каналах немає ударних кратерів, свідчить на користь їхньої геологічної юності (менше кількох мільйонів років, а, можливо, й кількох тижнів, чи навіть днів). Для пояснення цього були детально досліджені властивості концентрованих розчинів солей, деякі з яких мають значно нижчу температуру замерзання, ніж звичайна вода. Особливу увагу приділили розчину, до складу якого входить сульфат тривалентного заліза $Fe_2(SO_4)_3$, виявлений у деяких геологічних формаціях планети.

Виявилось, що температура замерзання цього розчину дорівнює 205 ± 1 K при концентрації сульфату заліза $48 \pm 2\%$ за масою; інтенсивність випаровування змінюється від 0,42 мм/год. (масова концентрація сульфату — 29,1%) до 0,03 мм/год. (58,2%), що майже у двадцять разів менше від показників звичайної води. Через таке поєднання властивостей дійшли висновку, що цей розчин може залишатися в рідкому стані навіть за існуючих зараз на Марсі умов.

У 2007 р. НАСА запустило автоматичну станцію **«Phoenix»** («Фенікс»), яка здійснила посадку на північну полярну шапку Марса з метою вивчення геологічної історії води як ключа до розуміння минулих кліматичних змін, а також пошуку зон, сприятливих для розвитку життя у так званому «біологічно

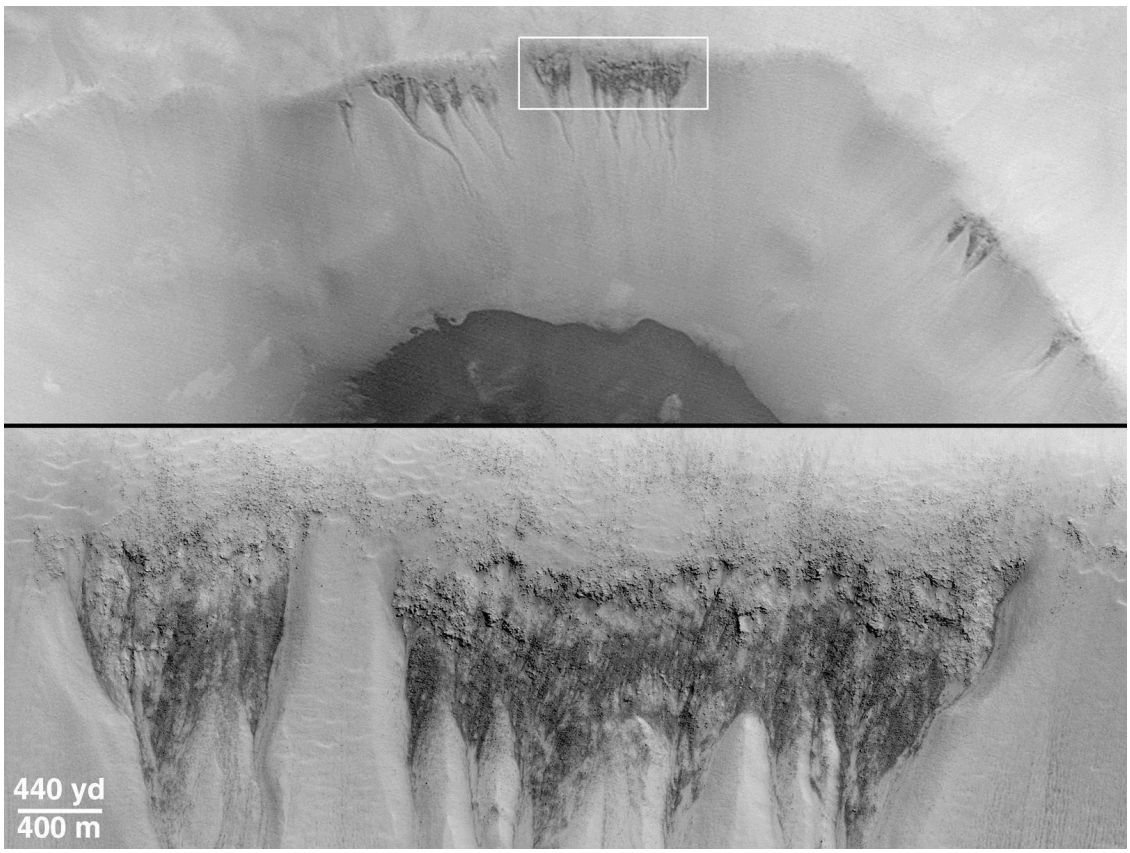

Рис. 7. Зверху — отримане КА «Марс глобал сервейєр» зображення області Noachis Terra; внизу — крупний план врізки з темними V-подібними ярами, які складаються з багатьох малих, у кілька метрів, рівчаків

придатному ґрунті» — тобто, в частині поверхневого шару, низ якого прилягає до крижаного покрову полярної шапки.

У 2009 р. НАСА відправило на Марс великий марсохід і супутник для забезпечення його радіозв'язку з Землею «**Mars Science Laboratory**» («Марсіанська наукова лабораторія»), який досяг планети в 2010 р.

4. СПРЯМОВАНІ ДО МЕРКУРІЯ КОСМІЧНІ АПАРАТИ

Меркурій — найближча до Сонця планета, у якої практично немає постійної атмосфери. Це найменша планета земної групи за формою близька до сфери з екваторіальним радіусом 2439 ± 2 км. При прольотах КА «Маринер-10» і «Мессенджер» поблизу Меркурія було зареєстровано магнітне поле, яке дозволило припустити наявність металевого ядра з розміром до 2/3 діаметра планети та масою до 80% усієї маси Меркурія. Сонячна доба на Меркурії триває два меркуріанські роки, або три меркуріанські зоряні доби! В результаті такого руху планети по орбіті на її поверхні виділяються так звані «гарячі довготи» — тобто два протилежних меридіани, які по черзі повернені до Сонця під час проходження Меркурієм точки перигелію і тому тут буває особливо гаряче навіть за меркуріанськими мірками. Найгарячішою є так звана область Калоріс або Долина Спеки.

КА «Маринер-10» НАСА стартував 3 листопада 1973 р. з метою вивчення планет Венери й Меркурія з пролітної траєкторії. Він був оснащений двома однаковими камерами на видимий та УФ діапазони, УФ спектрометром, ІЧ радіометром, детектором сонячної плазми, комплектом лічильників Гейгера–Мюллера для реєстрації заряджених частинок та двома магнітометрами, винесені на штанзі довжиною 7 м. Він був першим апаратом, що використав гравітаційний маневр, змінивши за допомогою Венери свій перигелій для зближення з орбітою Меркурія. Поблизу Меркурія він пролітав 29 березня (на відстані 703 км), 21 вересня 1974 р. (48 070 км) і 16 березня 1975 р. (327 км). Передані КА «Маринер-10» знімки Меркурія з близької відстані дуже подібні до знімків Місяця, тому не дивно, що одразу заговорили про подібність процесів формування поверхневих шарів цих тіл. Особливо актуальним це стало після виявлення на Меркурії розломів і вулканічних кратерів (рис. 8) і безлічі невеликих кратерів у Долині Спеки — одному з наймолодших басейнів на планетах Сонячної системи.

КА «Мессенджер» НАСА мав на борту таке обладнання. 1) Дворежимна камера MDI (Mercury Dual Imaging System) для топографічної зйомки й детального дослідження ландшафту, яка включала ширококутну (поле зору 10,5° і 12 різних фільтрів у спектральному діапазоні 400–1100 нм) й вузькокутну (поле зору 1,5°, чорно-білі зображення) мультиспектральні камери. 2) Рентгенівський спектрометр XRS (X-Ray Spectrometer) призначений для визначення елементного складу тонкого (до 1 мм) верхнього шару поверхні Меркурія з просторовою роздільною здатністю 200–1000 км. Він реєструє рентгенівське випромінювання з енергією в межах 1–10 кеВ, де перебувають спектральні лінії магнію, алюмінію, кремнію, сірки, кальцію, титану й заліза, а також сонячне рентгенівське і гамма-випромінювання. 3) Гамма-спектрометр і нейтронний спектрометр GRNS (Gamma-Ray and Neutron Spectrometer) для реєстрації нейтронів і гамма-променів від елементів на поверхні Меркурія, що з'являються під дією

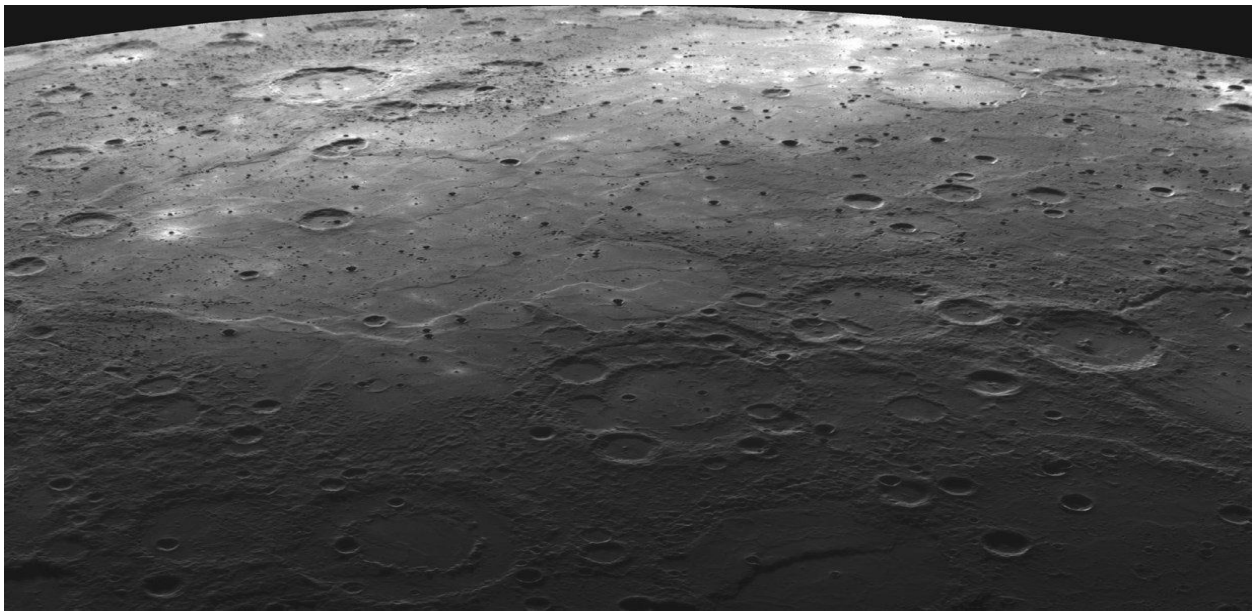

Рис. 8. Вулканічний рельєф на західному лімбі Меркурія змонтований з переданих КА «Мессенджер» зображень. Уздовж нижнього краю видно стародавній, сильно порізаний рельєф, в середині і зліва — рівні ударні басейни, по яких розкидані маленькі ударні кратери.

космічного випромінювання, а також природного випромінювання радіоактивних елементів. Прилад застосований для картографування поверхні планети з метою визначення елементного складу її кори, і, зокрема, для виявлення криги на полюсах. 4) Спектрометр частинок з високою енергією та плазми EPPS (Energetic Particle and Plasma Spectrometer) для вивчення складу, розподілу та енергії заряджених частинок у магнітосфері Меркурія. Він складається зі спектрометра заряджених частинок EPS і високошвидкісного плазмового спектрометра FIPS. 5) Спектрометр для дослідження складу атмосфери і поверхні MASCS (Mercury Atmospheric and Surface Composition Spectrometer) Меркурія. Містить два спектрометри: видимого й УФ та видимого й ІЧ діапазонів. 6) Лазерний висотомір MLA (Mercury Laser Altimeter) для високоточної топографічної зйомки поверхні Меркурія. 7) Трикомпонентний магнітометр MAG для дослідження магнітних аномалій на поверхні Меркурія та для вивчення структури й динаміки магнітного поля.

Дані КА «Мессенджер» показують, що на раніше не досліджуваній півкулі кратерів менше і значну її частину покривають рівнини, залиті лавою, а тому масштаби вулканічної активності раніше істотно недооцінювались. Знімки показали, що багато великих кратерів на Меркурії всередині доволі плоскі. Більше двох третин вивченої поверхні планети сформувалося дуже давно, близько 4 млрд. років тому, і вона вкрита великою кількістю кратерів. Долина Спеки дуже подібна до колових морів на Місяці. Гірське кільце, що оточує западину, піднімається над її дном на 2 км. Її виникненню мало передувати зіткнення Меркурія з великим небесним тілом не менше 100 км діаметром на ранньому етапі геологічної історії планети. Удар стався близько 3,8 млрд. років тому, спричинивши тимчасове пожвавлення вулканічної діяльності, яка майже припинилася за 100 млн. років до того. Вулканізм згладив поверхню всередині й навколо западини, отже, рівнина утворилася через витік лави з надр планети після зіткнення. Западина заповнилася лавою і вирівнялася, причому частина області викиду має подібну поверхню. Плоске дно оточене розломами і звивистими гребенями гір. Діаметр рівнини — 1300 км — складає майже чверть діаметра планети (Океан Бур на Місяці — 1800 км). Удар був такий сильний, що сейсмічні хвилі пройшли всю планету і сфокусувались у протилежній точці поверхні, утворивши там своєрідний посічений «хаотичний» ландшафт. На іншому боці планети, точно навпроти западини, де розташована Долина Спеки, є ще одне унікальне утворення — горбисто-лінійчата місцевість. На ній розташовані численні великі горби 5–10 км у діаметрі і до 1–2 км заввишки, пересічені кількома прямолінійними долинами, очевидно утвореними за лініями розломів кори планети. Знаходження цієї місцевості в районі, протилежному Рівнині Спеки, стало основою гіпотези формування рельєфу внаслідок зосередження сейсмічної енергії від удару астероїда, що утворив Рівнину Спеки. Ця гіпотеза мала непряме підтвердження, коли на Місяці виявили ділянки того ж рельєфу, розташовані діаметрально протилежно до двох найбільших кільцевих утворень Місяця, наприклад, для Моря Дощів і Моря Східного.

Поверхня Меркурія усіяна безліччю кратерів, щільність розташування яких на різних ділянках різна. Що густіше всіяні кратерами ділянки, то вони є древнішими, а менша кількість кратерів знаходиться на молодших, які утворилися після затоплення лавою старішої частини поверхні планети. Припідняті ділянки навколо місячних кратерів складаються з викинутого при кратероутворювальному вибуху матеріалу типу базальту і вони у півтора рази ширші за такі ж на Меркурії при однаковому розмірі «материнських» кратерів. Пояснення в тому, що при майже однакових лінійних розмірах Меркурія і Місяця більша густина породи на поверхні Меркурія перешкоджала розльоту ґрунту.

За аналогією з місячними «морями» виявлені на поверхні планети гладкі округлі рівнини назвали басейнами. Поява долин пояснюється інтенсивною вулканічною діяльністю, що збіглася в часі з формуванням поверхні планети. Деякі з них можуть бути наслідком дії древніх вулканів, інші — результатом відкладення речовини, викинутої при утворенні кратерів під час пізніших зіткнень. На Меркурії є й гори висотою до 6 км і западини глибиною до 3 км. Виявлені досить незвичні деталі рельєфу — *ескарпи*, які є виступами від кількох сотень метрів до 3 км у висоту, що розділяють два райони поверхневого шару. Тобто на Меркурії видно утворення, яких на Місяці немає зовсім і які є дуже рідкісними на Марсі.

5. ВЕНЕРУ ВИВЧАЮТЬ КОСМІЧНІ АПАРАТИ

Венера оповита такою щільною атмосферою, що першу інформацію про її поверхневий шар одержали тільки в другій половині XX ст. спочатку із спостережень у радіодіапазоні (особливо радіолокаційних), а пізніше — при безпосередньому фотографуванні в місцях посадки КА. Період і напрямок обертання планети навколо власної осі визначено за даними РЛ експериментів і рішенням Міжнародного астрономічного союзу в 1970 р. період обертання Венери навколо власної осі було прийнято за 243 земних доби, що дуже близько до величини резонансного періоду обертання (243,16 земної доби). Радіус твердої поверхні (6057 ± 55 км) вперше було визначено в 1965 р. за радіоінтерферометричними спостереженнями при $\lambda = 10{,}6$ см. Венера досліджена космічними засобами дуже докладно і поступається лише Місяцю й Марсу.

12.02.1961 р. «Венера-1» (СРСР) вперше полетіла до Венери. Вона була обладнана магнітометром, датчиками радіації тощо, а на її оболонці була встановлена спеціальна сфера з радянським вимпелом,

який після приземлення повинен був плавати в передбачуваному тоді океані Венери. Через 7 днів після запуску контакт зі станцією було втрачено і КА «Венера-1» пройшов мимо планети на відстані 100 000 км.

22.07.1962 р. запущено **«Маринер-1»** (США), але через 293 с після старту ракета відхилилася від заданого курсу і сталась аварія.

25.08.1962 р. запущено **«Спутник-19»** (СРСР) — КА типу «Венера», але при виході на земну орбіту сталися неполадки.

27.08.1962 р. запущено **резервний КА «Маринер-1»** (США), який через неполадки хоча й пролетів мимо Венери на відстані 34 773 км, але все ж таки зареєстрував повільне обертання Венери, високу температуру поверхні, високий тиск, неперервний хмарний покрив і відсутність магнітного поля.

1.09.1962 р. запущено **«Спутник-20»** (СРСР), але на земній орбіті сталися неполадки.

12.09.1962 р. запущено **«Спутник-21»** (СРСР), призначений для демонстраційного прольоту біля Венери; сталась аварія.

11.11.1963 р. запущено **«Космос-21»** (СРСР) для перевірки технології польоту до Венери, але КА залишився на земній орбіті.

19.02.1964 р. (**«Венера-1964А»**) та **1.03.1964 р.** (**«Венера-1964В»**) (СРСР) — запуски виявилися невдалими.

27.03.1964 р. запущено **«Космос-27»** (СРСР), який залишився на земній орбіті. Відмітимо, що з 1962 р. назву «Космос» давали всім станціям, які залишалися на земній орбіті, незалежно від їх початкового спрямування.

2.04.1964 р. запущено **КА «Зонд-1»** (СРСР), який пролетів біля Венери на відстані 100 000 км.

12.11.1965 р. запущено **КА «Венера 2»** (СРСР), який було оснащено науковими приладами й телевізійною системою та який 27 лютого 1966 р. пролетів на відстані 24 000 км від Венери.

16.11.1965 р. запущено **КА «Венера-3»** (СРСР), який мав опуститись на поверхню та мав на борту систему радіозв'язку, наукові інструменти, джерело електроенергії і герб СРСР. Досяг Венери в березні 1966 р., але спускний апарат інформації не передав.

23.11.1965 р. запущено **КА «Космос-96»** (СРСР), але на земній орбіті сталася аварія.

12.06.1967 р. запущено **КА «Венера-4»** (СРСР), призначений для дослідження Марса й Венери з пролітної траєкторії та з посадочним апаратом. 18 жовтня 1967 р. КА увійшов в атмосферу та передавав дані про тиск, температуру і склад атмосфери до висоти 24,96 км, на якій він був роздавлений атмосферою.

14.06.1967 р. запущено **КА «Маринер-5»** (США). 19 жовтня 1967 р. він пролетів на відстані 4000 км від Венери.

17.06.1967 р. запущено **КА «Космос-167»** (СРСР), який залишився на земній орбіті.

05.01.1969 р. запущено **КА «Венера-5»** (СРСР). Спеціальна капсула опустилась в атмосферу на парашутах і пропрацювала 53 хв., а потім була роздавлена атмосферою. До складу апаратури спускного апарату входили датчики для вимірювання тиску атмосфери в діапазоні від 0,13 до 40 бар, газоаналізатори для визначення хімічного складу атмосфери, прилади для вимірювання освітленості в атмосфері, визначення щільності і температури атмосфери.

10.01.1969 р. запущено **КА «Венера-6»** (СРСР), який був копією «Венери-4 і -5», тому і цей спускний апарат був роздавлений атмосферою. Фотометр спускного апарата зареєстрував освітленість, нижчу за порогове значення. Під час перельоту отримані нові дані про структуру потоків плазми (сонячного вітру) поблизу Венери. При наближенні до планети зареєстровані зміни цих потоків, характерні для області обтікання Венери сонячним вітром. Як і очікувалося, фронт зміни потоків плазми спостерігався на відстані близько 28 000 км від поверхні планети. Раніше станція «Венера-4» опускалася на нічний бік планети, але ближче до термінатора, тому вона перетнула цей фронт на відстані близько 19 000 км від поверхні планети.

17.08.1970 р. запущено КА **«Венера-7»** (СРСР). Спускний апарат увійшов в атмосферу планети 15 грудня 1970 р. спочатку за допомогою аеродинамічного гальмування, а потім — на парашутах та досяг поверхні планети, пропрацювавши там 23 хвилини. Були передані дані про склад атмосфери, температуру її різних шарів і на поверхні, а також про зміну тиску. До складу апаратури входили гама-спектрометр для визначення типу поверхневих порід планети, комплект апаратури для визначення температури і тиску атмосфери, прилад для вимірювання максимального прискорення на ділянці гальмування спускного апарату.

27.03.1972 р. запущено **КА «Венера-8»** (СРСР). Через 117 днів, 22 липня 1972 р., було здійснено вхід в атмосферу апарату, що мав систему охолодження. На висоті 60 км над поверхнею відкрився парашут діаметром 2,5 м. Вперше відбулася посадка на денний бік планети. На висоті 35–30 км було відмічено різке зменшення освітлення. До складу апаратури входили гама-спектрометр для визначення типу поверхневих порід планети, прилад для вимірювання вмісту аміаку в атмосфері, фотометр

для визначення освітленості поверхні, прилад для вимірювання максимального прискорення на ділянці гальмування, комплект апаратури для визначення температури і тиску атмосфери.

31.03.1972 р. запущено МПС **«Космос-482»** (СРСР), яка залишилася на земній орбіті.

04.11.1973 р. запущено **КА «Маринер-10»** (США), один із найуспішніших запусків серії «Маринер». Апарат використав силу тяжіння Венери для розгону до своєї кінцевої мети — Меркурія.

08.06.1975 р. запущено КА **«Венера-9»**, а **14.06.1975 — «Венера-10»** (СРСР). Перший здійснив посадку 22 жовтня 1975 р. на освітленому боці планети, другий — 25 жовтня 1975 р. на відстані 2200 км від попереднього. Завдяки системі охолодження «Венера-9» працював на поверхні планети 53 хв. Для посадки використали три парашути і металеву подушку. Обидві станції вперше передали на Землю панорами довкілля. Протягом 53 хв. орбітальні модулі обох КА ретранслювали наукову інформацію з поверхні планети на Землю. Панорамні зображення були кольоровими, переважали жовто-оранжеві й зеленуваті кольори предметів на поверхні, оранжеве небо й хмари. Пояснення в тому, що синя частина спектру сонячного випромінювання поглинається верхньою частиною атмосфери Венери, тому її поверхня і нижня частина атмосфери освітлюються не білим, як на Землі, а жовтим світлом.

20.05.1978 р. запущено **КА «Піонер-Венера-1»** (США), який 4 грудня 1978 р. було виведено на низьку орбіту. За допомогою РЛ зондування вдалося роздивитися особливості рельєфу значної частини поверхні Венери та за результатами вимірювання висоти поверхні було складено карти з великими плато, окремими гірськими масивами і низинами.

08.08.1978 р. запущено **КА «Піонер-Венера-2»** (США), який скинув один великий (діаметром 1,5 м і масою 316 кг) і три малі (діаметром 0,7 м і масою 96,6 кг) спускні апарати на денний і нічний бік, а також в район північного полюса планети. Вони передавали інформацію під час спуску, а один з малих апаратів навіть витримав удар об поверхню і потім ще протягом однієї години передавав дані з поверхні планети. Результати цього експерименту підтвердили хімічний склад атмосфери, а на поверхні було виявлено тонкий шар пилу.

09.09.1978 р. запущено **КА «Венера-11»** (СРСР). Вхід в атмосферу було здійснено 25 грудня 1978 р., посадка зайняла 1 годину. Швидкість приземлення складала 7–8 м/с. Прилади станції зареєстрували електричні розряди в атмосфері планети: 25 спалахів блискавки за секунду, причому один з розкатів грому продовжувався 15 хв. Вважають, що виникненню цих розрядів сприяє високий вміст сульфатної кислоти в хмарах.

14.09.1978 р. запущено **КА «Венера-12»** (СРСР). Він опустився на відстані 800 км від КА «Венера-11» і зареєстрував до 1000 спалахів блискавки.

30.10.1981 р. запущено **КА «Венера-13»**, а **04.11.1981 р.** — подібний до нього **КА «Венера 14»** (СРСР). Посадка відбулася 1 і 5 березня на відстані 950 км один від одного. Передані дані про хімічний склад порід у місцях посадки, зібраних за допомогою спеціальних ґрунтозабірних пристроїв, які поміщали породу всередину спускного апарату. На Землі спостережні дані для цих порід порівняли з базальтами, які зустрічаються в глибоководних западинах земних океанів.

02.06.1983 р. запущено **КА «Венера-15»** та **07.06.1983 р. — «Венера-16»** (СРСР). З орбітальних модулів, обладнаних РЛ системами, передавали зображення поверхні частини північної півкулі планети і дані про висоту рельєфу. В результаті кожного прольоту сильно витягнутими, близькими до полярної, орбітами зареєстровано смугу місцевості шириною 160 км і довжиною 8000 км. За матеріалами цих зйомок складено атлас поверхні Венери, в тому числі карти рельєфу, геологічні та інші спеціальні карти.

15 і **21.12.1984 р.** запущені **КА «Венера-15»** («Вега-1») і **«Венера-16»** («Вега-2», СРСР), основною задачею яких було дослідження комети Галлея. Спускні апарати нового типу складалися з посадочного модуля і аеродинамічного зонда. Зонди протягом двох діб дрейфували на висоті близько 54 км і передавали дані. При зондуванні атмосфери ІЧ променями визначали дальність видимості у хмарах. Посадочні апарати призначались для дослідження атмосфери і поверхні планети. Вперше посадочні модулі були оснащені УФ спектрометрами для визначення малих складових атмосфери в тому числі концентрації водяної пари. Аеростатні зонди продрейфували майже по 9000 км кожен, а після виходу на освітлений бік — лопнули.

04.05.1989 р. запущено **КА «Магеллан»** (США). Він досяг Венери 10 серпня 1990 р., вийшов на низьку полярну орбіту висотою 300 км та працював там до 12 жовтня 1994 р., коли зв'язок перервався. Завдяки регулярній бістатичній РЛ зйомці упродовж кількох років одержали найдокладніший рельєф усієї поверхні Венери з просторовою роздільною здатністю менше 100 м. Виявлено відсутність тектоніки плит, 85% поверхні вкрито вулканічними потоками, а 15% — горами; відмічено дуже повільний процес ерозії; середній вік порід поверхні — 500 млн. років; складено карти висот поверхні Венери і карту електропровідності гірських порід. Протягом останніх 2 років вимірювали гравітаційні аномалії Венери для побудови карти стану її надр.

09.11.2005 р. запущено міжпланетний зонд **«Венера-Експрес»** (Venus Express) (ЄКА). Науковою

метою експедиції було детальне вивчення плазмового середовища Венери та його взаємодія з сонячним вітром. Досліджувалась поверхня планети і динаміка атмосферних процесів на Венері, структура, склад і хімія атмосфери, хмаровий шар і туман, радіаційний баланс, властивості поверхні і геологія. Апарат досяг Венери в квітні 2006 р. і вже у сфері тяжіння планети було включено двигуни для переходу на орбіту штучного супутника. Маневруючи протягом п'яти діб, апарат вийшов на робочу орбіту над полюсами планети з мінімальним віддаленням 250 км і максимальним 6600 км від її поверхні.

5.1. Назви на Венері

За рішенням МАС, на карті Венери повинні бути лише назви жіночого роду, оскільки з класичних планет лише вона та Земля носять жіноче ім'я. Назви деталей рельєфу беруть з міфології різних народів світу і присвоюють відповідно до заведеного порядку. Так, височинам (гори, плато, хребти, гряди) дають імена богинь, низинам — героїнь міфів. На Венері знайшлося місце для імен і прізвищ реальних жінок у назвах кратерів, причому кратери більше 20 км у діаметрі названі прізвищами відомих особистостей (посмертно), а малі кратери — власними іменами. Так, на високогірному плато Лакшмі можна зустріти невеликі кратери Берта, Людмила й Тамара, розташовані південніше гір Фреї і на схід від великого кратера Осипенко. Гірську місцевість у північній півкулі планети перетинає довгий каньйон Ступи Баби Яги, а вздовж однієї з рівнин тягнуться гряди Відьом. Навколо північного полюса простирається рівнина Лоухі — владарки півночі у карельських і фінських міфах, та рівнина Снігурочки. В іншій частині планети, поруч із вінцем Нефертіті, розташований кратер Потаніна, за прізвищем російського дослідника Центральної Азії, поруч — кратер Войнич (англійської письменниці, автора роману «Овод»). Різними районами Венери розкиданий весь гарем Абдули з фільму «Біле сонце пустелі»; не забули й «люб'язну Катерину Матвіївну», дружину товариша Сухова. Ця планета загалом лідирує серед усіх планетних тіл за кількістю названих деталей та розмаїттям походження назв. Тут зустрічаються імена з міфів 192 різних національностей та етнічних груп усіх континентів світу, але без утворення «національних районів». Найбільші деталі рельєфу Венери — великі височини, своєрідні континенти або материки — називаються «землями». Вони досягають 5000–10 000 км у поперечнику і на 3–5 км височіють над оточуючими їх низинами. Земель на Венері три і всі носять імена богинь любові: поблизу екватора найбільша — Земля Афродіта (грецька богиня), біля північного полюса — Земля Іштар (вавилонська богиня), а ближче до південного полюса — Земля Лада (слов'янська богиня). Кратер Зоя діаметром 22 км — типовий малий кратер на Венері; діаметр 80% з 967 знайдених метеоритних кратерів Венери менше 30 км. На радарних знімках їхнє дно темне, що вказує на гладку поверхню. Вали цих кратерів і викиди з них — світлі через сильне розсіяння радарного сигналу внаслідок значної шорсткості цих частин поверхні, покритих уламками кам'яного матеріалу, викинутого вибухом під час утворення кратера.

5.2. Оптичні та хімічні властивості поверхневого шару

З місця посадки модулів КА «Венера-9» і «Венера-10», рознесених на 2000 км один від одного, 22 і 25 жовтня 1975 р. вперше було передано на Землю панорами довкілля в інтегральному світлі (рис. 9), спектральний діапазон визначався розподілом енергії штучного джерела підсвічення та чутливістю фотоелектричного приймача ФЕП-114 з мультилужним фотокатодом. Просторова роздільна здатність становила 10 мм, панорами передавались протягом 50 та 45 хв. Виявилося, що відбивна здатність поверхневого шару надзвичайно низька (0,03–0,12), а геологоморфологічний аналіз показав, що камені в розсипах мають сплющену пластиноподібну форму, типове відношення висоти до поперечного розрізу 1 : 3 – 1 : 6. Через 7 років (1 і 5 березня 1982 р.) КА «Венера-13 і -14» протягом 100 та 59,5 хвилин передали ТВ панорами в межах 360° поля зору та приблизно із утричі більшою просторовою роздільною здатністю з інших місць. Панорами передавались в інтегральному світлі та в синій, зеленій і червоній ділянках спектра, завдяки чому вперше отримали кольорову панораму. Геологоморфологічний аналіз цих даних показав, що в місцях посадки на поверхню виходять гірські породи з тонкою горизонтальною шаруватістю.

З посадочних модулів КА «Венера-8, -9, -10» за допомогою сцинтиляційних γ-спектрометрів вперше визначили вміст природних радіоактивних елементів (калію, урану і торію) в поверхневому шарі. Детальніші дослідження були проведені з посадочних модулів КА «Венера-13, -14» та «Венера-16» за допомогою багатоканального рентгенівського спектрометра і мініатюрного грунтозабірника, який брав проби ґрунту з різної глибини і доставляв їх через шлюзовий канал до приладу. Ці зразки опромінювали із джерел радіоізотопів Pu^{238} та Fe^{55}, які збуджували флуоресцентне рентгенівське світіння, за аналізом якого визначили елементний склад ґрунту поверхневого шару Венери. Ці експерименти проводили в екстремальних умовах за атмосферного тиску 93 бари і температурі 470°С. Багаті на калій, уран і торій породи поверхневого шару відповідають складу не первинних земних вулканічних порід, а вторинних, таких, що зазнали значної екзогенної обробки. Особливістю переданих панорам є і те, що на поверхні залягає крупнощебінчатий і уламковий матеріал темних порід щільністю 2,7–2,9 г/см^3 та інші елементи, характерні для базальтів. Це означає, що поверхневі породи Венери є такими ж, як на Місяці, Меркурії й Марсі, тобто магматичними породами основного складу, що вилилися з-під кори планети.

Рис. 9. Панорами поверхні Венери в місці посадки КА «Венера-9» в секторі 180° поля зору

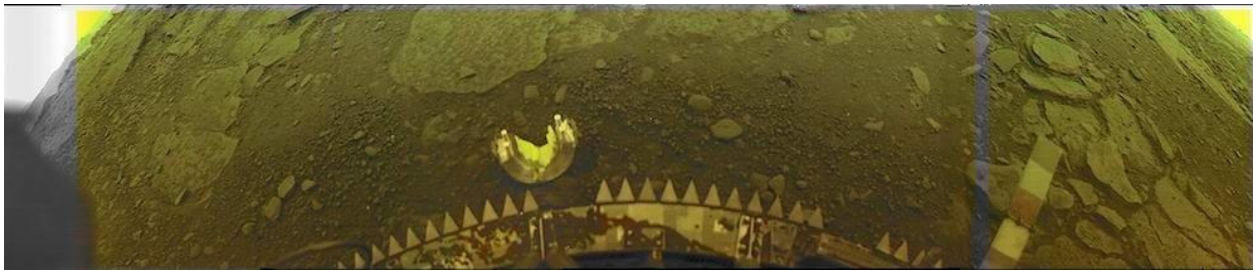

Рис. 10. Панорами поверхні Венери в місці посадки КА «Венера-13» (другий з двох секторів по 180°)

5.3. Особливості рельєфу поверхні

Структуру поверхневого шару Венери у планетарному масштабі визначали лише за даними РЛ експериментів і для локальних ділянок за переданими з місця посадки модулів панорамами. Основну частину поверхні Венери вкривають горбисті рівнини. Великі підвищення (до 10 км) займають простір розміром з Австралію, багато з них мають овальну форму і є, ймовірно, щитовими вулканами. Одне із підвищень нагадує марсіанський вулканічний гігант Олімп і має у поперечнику 300–400 км біля основи; але його висота лише 1 км, а в центрі гори є схожа на кальдеру депресія 80 км у діаметрі; мабуть, вулканічні форми взагалі поширені на Венері. На радіолокаційній карті, особливо в екваторіальному поясі, видно багато схожих на місячні кратерів, у більшості з них поперечник складає десятки кілометрів, а деякі досягають навіть 150 км, проте всі кратери значно плоскіші за місячні і тому навіть найбільші з них не глибші 400 м. На відміну від місячних і марсіанських кратерів, глибина яких зазвичай становить 3–5% від їх діаметра, венеріанських не перевищує 0,3% діаметра. Взагалі поверхня Венери, в порівнянні з іншими планетами, виявилася більше згладженою. Поряд із кратерами звичайних розмірів (у десятки, а рідше в 100 км у поперечнику) на Венері є гігантські овальні западини (депресії), подібні до Моря Дощів на Місяці, діаметром до 1000 км. Одна з них розташована в північній півкулі. Виявлено також багато великих тектонічних структур, подібних до відповідних структур на Землі та Марсі. Вулканічні утворення займають більшу частину території Венери та є в основному великими рівнинами, розташованими на середніх гіпсометричних рівнях або в низинах. На гладких рівнинах часто трапляються радіояскраві смуги та плями у десятки або й сотні кілометрів. Зустрічаються також системи валів та борозен, подібні до морських валів на Місяці. Скрізь присутні структури перекриття, коли древніші утворення частково проступають крізь матеріал рівнин. Такі горбисті рівнини ускладнені чисельними дрібними конусами та куполами (5–10 км у поперечнику), інколи з кратерами на вершинах. До вулканічно-тектонічних утворень належать куполоподібні височини (наприклад, гора Рея) і так звані «овоїди». Останні є кільцевими структурами діаметром 150–600 км, утворені концентричними грядами та борознами. Часто вони сильно деформовані та ледве видні на фоні базальтових рівнин. Між довготою 10–90° розташовані три величезні ділянки (площею до 6 млн. км^2) з унікальним рельєфом, названим «паркет», тому що являє систему довгих хребтів і долин з ортогональним рисунком. Припускають, що такий рельєф зумовлений особливістю температури і тиску на поверхні Венери. Ударні кратери трапляються скрізь на поверхні Венери. За морфологією вони подібні до ударних кратерів на інших небесних тілах, їхні розміри від 4–5 до 130 км. На панорамах у місцях посадки модулів КА «Венера» видно, що там багато уламків порід (часто з гострими краями), а проміжки між ними заповнені невеликою кількістю ґрунту. Ані піску, ані пилу, ані порошкоподібної речовини з включеннями кам'яних уламків виявлено не було, але знайдено тонкі щільні шаруваті породи, утворення яких пов'язують з осадженням з атмосфери вулканічного попелу і метеоритного пилу.

Використано фото із сайту http://photojournal.jpl.nasa.gov/

Надійшла до редакції 2.07.2014