

**Національний університет біоресурсів і
природокористування України**
ІНІ енергетики, автоматики та енергозбереження
КАФЕДРА ФІЗИКИ
Головна астрономічна обсерваторія НАН України

Відьмаченко А.П.

**ФІЗИЧНІ ПАРАМЕТРИ ПЛАНЕТИ МАРС
І ЇХ ВПЛИВ НА ЙОГО ОСВОЄННЯ**

**Методичні вказівки
(навчальне видання)**

Київ 2025

У методичних вказівках розглянуто основні фізичні параметри наступної від Сонця після Землі планети Марс. Через значний ексцентриситет орбіти найменша відстань між Землею і Марсом навіть у протистояння (приблизно кожні 780 днів) змінюється від 55 до 101 млн км. При наземних спостереженнях на поверхні Марса спостерігаються світлі (названі материки) і темні (моря) деталі. У полярних районах спостерігаються дуже світлі полярні шапки. Також на диску планети реєструвались світлі деталі конденсатної природи, фотометричний контраст яких збільшувався при зменшенні довжини хвилі λ . У довгохвильовій ділянці спектра проявлялися темніші деталі, які ототожнили з пиловими. В залежності від сезону та часу доби температура на поверхні змінюється від 293 К влітку біля екватора до 120 К на полюсах взимку. У багатьох країнах працюють над підготовкою умов для проживання астронавтів з метою відправити їх на цю планету. Тераформування Марса означає повну перебудову всієї його поверхні, клімату та атмосфери. Пропонується створювати окремі тепличні господарства. На поверхні Марса надто великі значення радіації. Тому для вирощування рослинної їжі на Марсі пропонується використовувати гідропонічні тепличні камери, вкриті від впливу радіації насипами ґрунту, або ж сховані під поверхню у лавових печерах.

Видання розраховане на викладачів вищих закладів освіти, студентів, аспірантів і фахівців, які спеціалізуються з астрономії та на широке коло зацікавлених.

*Рекомендовано Вченою радою навчально-наукового інституту енергетики, автоматики та енергозбереження Національного університету біоресурсів і природокористування України
(протокол № 3 від 22 квітня 2025 року)*

Рецензенти:

- доктор фізико-математичних наук, професор Головної астрономічної обсерваторії НАН України **О.В. Мороженко**
- доктор педагогічних наук, доцент Національного університету біоресурсів і природокористування України **Б.О. Грудинін**
- кандидат технічних наук, доцент Вінницького державного педагогічного університету ім. М. Коцюбинського **О.В. Мозговий**

Відьмаченко А.П. Фізичні параметри планети Марс і їх вплив на його освоєння // **Київ**: 2025. – 160 с.

Укладач: **ВІДЬМАЧЕНКО** **Анатолій Петрович**

Відповідальний за випуск проф. А.П. Відьмаченко

Редактор

Підписано до друку

Ум. друк. арк. _____

Наклад ___ пр.

Видавничий центр НУБіП України.

03041, Київ, вул. Героїв Оборони, 15.

Формат 60 x 84 1/16.

Обл.-вид. арк. _____

Зам. № _____

© А.П. Відьмаченко, 2025

© НУБіП України, 2025

ISBN XXXX

На обкладинці використані Рис. 8.3 і 24.1 (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>) із розділів даних методичних вказівок.

Зміст

		Стор.
	Вступ	4
1	Історія можливих змін на Марсі	7
2	Теплові властивості Марса	11
3	Макрорельєф поверхні Марса	16
4	Особливості полярних регіонів Марса	22
5	Плями навколо полярних областей Марса як сезонні «міні вулкани».	29
6	Мікрорельєф поверхні Марса	34
7	Координати і назви на Марсі	38
8	Атмосфера Марса	42
9	Пилові бурі на Марсі	49
10	Про механізми можливого періодичного перерозподілу водяного льоду між полярними шапками Марса.	53
11	Вулкани Марса	56
12	Порівняння особливостей ударних і вулканічних кратерів на поверхні Марса	66
13	Дуже «свіжі» ударні кратери говорять про замерзлу воду в поверхневому шарі ґрунту	70
14	Особливості марсіанської гідрології	73
15	Порівняння «древньої» і сучасної гідрології Марса	79
16	Замерзлі водойми Марса	83
17	Заморожені резервуари води під поверхнею Марса	89
18	Великі озерні басейни на Марсі	92
19	Про можливість існування рідкої води на поверхні Марса за сучасних умов	96
20	Сучасний вигляд колишніх рік на Марсі	102
21	Як пов'язані стародавні русла річок і недавні потоки води на Марсі	109
22	Рідка вода на поверхні Марса є прямо зараз	105
23	А може це не вода?	118
24	Лід на поверхні Марса	122
25	Заморожена вода в ґрунті Марса	126
26	Темні отвори на поверхні Марса є провалами до вулканічних печер	129
27	Темні отвори (плями) на Марсі можуть бути отворами до льодяних печер	133
28	Вулканічні і льодяні печери на Марсі	139
29	Які печери краще підходять для проживання на Марсі?	142
30	Наземна підготовка до вирощування врожаю на Марсі	145
	Список літератури	150

Вступ

Марс – наступна від Сонця після Землі планета [135]. Відзначимо, що мінімальна відстань між планетами не завжди співпадає з моментом протистояння. Через значний ексцентриситет орбіти (0.093) найменша відстань між Землею і Марсом у протистояння (тобто приблизно кожні 780 днів) змінюється майже у два рази: від 55 до 101 млн км. Такі зближення планет називають протистояннями (через синодичний період обертання Марса).

Середній інтервал часу між двома найближчими великими протистояннями (коли відстань між планетами менша 60 млн км) коливається в межах від 15 до 17 земних років. Але під дією зумовлених іншими планетами збурень орбітальний рух планети не є точно еліптичним. Тому умови спостереження з поверхні Землі залежать від того, наскільки близький він до перигелію, чи афелію. Оскільки орбіта Марса знаходиться зовні земної, то під час наземних спостережень інтервал зміни фазового кута обмежений ($\alpha \leq 47^\circ$). Тому в періоди протистоянь Марс можна спостерігати упродовж усієї ночі.

Форму Марса з високою точністю було визначено за даними радіозатемнень космічного апарату (КА) “Марінер-9”, який обертався навколо планети по нахиленій на 64° до площини екватора орбіті [99]. Статистичний аналіз даних цих експериментів дав можливість визначити радіуси А, В й С Марса у моделі його форми як тривісного еліпсоїда, та полярного стиснення $\{(A-C)/A\}$ [135]:

А, км	В, км	С, км	(A-C)/A
3398.67	3394.71	3378.44	0.00550

При наземних спостереженнях на поверхні Марса спостерігаються світлі (названі материками) і темні (моря) деталі [106]. Саме за ними було визначено період його обертання навколо осі ($24^h37^m22.6679^s$). Обертання Марса являється прямим (тобто, проти годинникової стрілки для того спостерігача, котрий знаходиться біля північного полюса). Крім материків і морів у полярних районах спостерігаються дуже світлі плями, потужність яких змінюється в часі, та які називають полярні шапки. Також, на диску планети над материками реєструвались короткоживучі (тривалістю в дні) світлі деталі [91]. Оскільки їх фотометричний контраст збільшувався при зменшенні довжини хвилі λ , то їм приписали конденсатну природу.

Над морями у довгохвильовій ділянці спектра проявлялися темніші деталі, які ототожнили з пиловими хмарами [98]. Час життя більшості з них обмежувався днями. Проте в деякі періоди вони починали швидко збільшуватись за розміром, і через короткий час вкривали практично всю поверхню планети [135]. Періоди, в які на поверхні весь час було видно окремі деталі диска, називають періодами з високою прозорістю атмосфери, а інші – періодами з глобальними пиловими бурями.

Зараз все частіше зустрічаються відомості про наближення дати направлення космічних кораблів з астронавтами для освоєння цієї планети. Уже протягом багатьох років в пустелі Сан-Рафаель (штат Юта, США) знаходиться спеціальна дослідницька станція. На ній проводять різні дослідження по симуляції можливого проживання майбутніх астронавтів на Марсі. Зовнішній вигляд станції можна вважати своєрідним геологічним аналогом пустелі на поверхні Марса.

Марс не являється хорошим місцем для перебування там людини. В залежності від сезону та часу доби температура на поверхні змінюється від 293 К влітку біля екватора до 120 К на полюсах взимку. Тому в багатьох країнах працюють над можливою підготовкою умов для проживання астронавтів з метою відправити їх в майбутньому на цю планету. Подорож до Марса можна здійснювати лише один раз на майже 2 роки, і вона займатиме від 7 до 9 місяців. Це пов'язано з тим, що при обертанні

Землі і Марса навколо Сонця, якраз через два роки обидві планети періодично знаходяться на найближчій відстані: у протистоянні.

Колоністи повинні будуть забезпечувати себе їжею. Взятого з собою із Землі провіанту надовго не вистачить. Тому, окрім найрізноманітніших проблем, із котрими доведеться зустрітися там першим поселенцям, важливою проблемою стане і забезпечення їх їжею. Люди зможуть заселити цю планету тільки у випадку, якщо вони матимуть там найнеобхідніше: повітря, їжу, тепло і захист від радіації. Тобто, для створення колонії на Марсі, необхідно буде облаштувати цілісну екосистему, у котрій можна буде виконувати значну кількість життєвоважливих для людини функцій, при наборі необхідних рослин і тварин.

Гравітація на Марсі становить третину від земної. Немає якоїсь прямої методики змінити силу тяжіння. А низька сила тяжіння негативно впливатиме на м'язову та кісткову маси і людей, і тварин. Тому, ймовірно, для заселення Марс найкращими будуть істоти невеликих розмірів, такі як ракоподібні, риби, інші мешканці морських глибин, миші, комахи тощо. Саме їх можна буде вживати в їжу, і вони не потребують значних ресурсів для свого розведення.

Крім того, бази для проживання на Марсі потрібно будувати із врахуванням звичних для людини значень тиску, температури й складу повітря. Висока солоність розталої води та відсутність у марсіанському ґрунті поживних речовин роблять ці умови непридатними для прямого використання при вирощуванні потрібних для харчування культур. Тому необхідно розробити стратегію збагачення марсіанського ґрунту поживними речовинами і методами опріснення дуже солоної води.

Численні дослідження також показали, що ґрунт на марсіанській поверхні містить значну кількість токсичних хімічних сполук та перхлоратної солі. Вони є дуже шкідливими для земних рослин. Так зване тераформування Марса означає повну перебудову всієї його поверхні, клімату та атмосфери. Проте це дуже тривалий і важкий процес. Тому поки що пропонується створювати окремі тепличні господарства.

З цією метою в лабораторії Університету штату Айова в США провели спеціальні дослідження. Для опріснення морської води використовували особливі морські бактерії; потім її фільтрували через земні вулканічні породи. Адаже на Марсі ґрунт якраз і є продуктами минулих вулканічних вивержень. Дослідники починали із вирощування люцерни у вулканічному ґрунті, котрий нагадував реголіт на Марсі. Далі з неї виготовляли добриво. У цьому майже «марсіанському» ґрунті змогли виростити ріпу, редис та салат. В цій імітації марсіанського ґрунту виростили ще й два генетично відредаговані сорти рису та один дикий. У такому сухому та солоному ґрунті в досить екстремальних умовах змогла вирости й картопля.

Експерименти змогли показати, що кількість перхлорату у три грами на один кілограм ґрунту являється пороговою величиною, за якою нічого корисного рости вже не може. А в ґрунті що містив менше 1 грама перхлоратів в кілограмі все ще могли вкорінуватись модифіковані сорти рису. Після цього у подібних штучних умовах змогли зібрати також урожаї помідорів, моркви, зеленої квасолі, салату-латуку, крес-салату, жита. Доволі успішно вирощувати там ще й гриби.

Таким чином, значною проблемою, з якою зіткнуться «аграрії» на Марсі, будуть перхлорати. Хоча зрозуміло, що потрібно перебороти низькі температури, радіацію тощо. Проведені дослідження підтвердили можливість не тільки вирощувати їжу для майбутніх поселенців на Марсі, але й отримувати насіння із цих культур. Оцінки кліматичних умов поблизу екватора показали, що вдень там може бути достатньо тепло для розміщення тепличних господарств. Проте їх потрібно ізолювати від впливу радіації, обігрівати сонячними технологіями та електричним опаленням, облаштувати умовами для підвищення атмосферного тиску, порівняно з існуючим зараз на Марсі.

В одному із проведених досліджень також було з'ясовано, що використовувати на Марсі тепличні будівлі з прозорим дахом і стінами для вирощування рослинної їжі за сучасних умов – є неможливим. Адже значення радіації на поверхні Марса у понад 17 раз більше від значень на поверхні Землі. Експерименти упродовж майже одного місяця показали непридатність вирощена таким способом їжі для споживання.

Тобто, на поверхні Марса сонячного світла порівняно мало, і там надто великі значення радіації. Тому ми пропонуємо, що гідропонічні камери для вирощування рослинної їжі значно краще вкрити від впливу радіації насипами ґрунту, або ж узагалі сховати їх під поверхню у знайдених зараз лавових печерах. Контролювати спектр у таких теплицях та інтенсивність освітлення можна буде за допомогою штучних джерел світла. Строго контролюватися також будуть якість води для поливу та поживні речовини у гідропоніці.

Це все – у недалекому (чи ні?) майбутньому. А поки що розглянемо основні фізичні параметри планети Марс, запропонуємо місця для висадки астронавтів, місця для розташування перших колоній та для розміщення найперших поселень на цій сусідній планеті.

1. Історія можливих змін клімату на Марсі.

Вважають, що раніше на Марсі була вода [79], й по його поверхні текли повноводні ріки. Цілком можливо, що там могла бути значна кількість кисню, завдяки якому Марс і набув червоного кольору. Адже атмосферний кисень тоді міг окислити місцеві породи. Тому зараз там переважають породи [103, 135] темних відтінків (андезіти й базальти з високим вмістом оксиду заліза в складі силікатних мінералів). А основу на поверхневому шарі ґрунту складають продукти вивітрювання, які складаються з оксидів заліза червоно-бурих кольорів із домішками глини й сульфатів кальцію та магнію (20%). Аномально багато також там знайдено окислів тривалентного заліза (до 20%). Добре відомо, що подібна кора утворюється лише в умовах достатку води і вільного кисню в атмосфері. А Марс міг стати червоним саме тому, що його поверхня покрилася шаром іржі.

Згідно деяких підрахунків, у марсіанській атмосфері колись могло бути понад 1000 трильйонів тон кисню. Це, наприклад, є досить значною кількістю навіть порівняно із 3200 трильйонами тон земного кисню. А зважаючи на менші розміри (28% від площі поверхні Землі), Марс колись міг мати практично земну кисневу атмосферу і запаси води у вигляді морів і річок. Згідно деяких припущень, атмосфера й вода були втрачені після потужного одноразового бомбардування метеоритами великих розмірів. Вони могли з'явитися, наприклад, після гравітаційного розриву гіпотетичного третього супутника Марса – Танатоса.

Припускають, що таке ж може повторитися у випадку, коли супутник Марса Фобос наблизиться до межі Роша; тобто, до орбіти, на якій гравітаційні сили розірвуть величезну (26×21 км) брилу супутника і знову засиплять планету метеоритним дощем.

Про можливе бомбардування говорять збережені метеоритні кратери, та велика кількість на поверхні магнітного піску (маггеміту), який утворюється при окисленні магнетиту й одночасному його прожарюванні. Адже одиночний метеорит, навіть дуже великий, не в змозі засипати планету порошком маггеміту. Для цього потрібна одночасна атака десятків великих осколків. Подібна речовина зустрічається на Землі на території Якутії, де, як вважають, 35 млн років тому там упали осколки великого (до 10 км) астероїда. Пропонувалося, що червоного кольору Марсу надали саме метеорити.

Дослідження КА «Пасфайндер» показали, що марсіанський пил містить значно більше магнію й заліза, ніж скельні породи. А коли в спеціальну камеру, де створили подібну до Марса атмосферу, помістили залізо і опромінювали ультрафіолетовими променями, то вже через тиждень метал почав там іржавіти навіть без дії води.

Про активне бомбардування поверхні Марса, при якому з неї вибивалися уламки речовини, говорять ударні кратери з розміром понад 3 км. Вважають, що астероїд діаметром 150 м, падаючи на поверхню Марса з швидкістю 10 км/с, може викидати до 10 млн. уламків з розміром близько 0.05 м. Якщо їх швидкість досягне 5 км/с, вони можуть опинитися на орбіті навколо Марса. І тоді близько 7.5% цих уламків протягом 10 млн. років після удару можуть упасти на Землю. За статистикою, кожного місяця на Землю падає в середньому один такий метеорит. Поки що їх знайдено лише 26.

Удари великих астероїдів по Марсу могли відбуватися один раз на 200 000 років. Свідченням цього є рівнина Хеллас, розташована недалеко від південної полярної області Марса. Вона є басейном діаметром понад 4000 км, який донизу звужується та оточений викидами породи. Його глибина подекуди сягає 9 км. На поверхні Марса присутні так звані маскони, які свідчать про більшу щільність породи під ними. На увагу заслуговує ланцюжок з п'яти гігантських кратерів – Argyre, Hellas, Isidis, Thaumasia, Utopia. Всі вони лежать на одній дузі великого кола з центром на широті -30° і довготі 175°. Близький вік і особливості їх розташування дозволили припустити, що всі вони утворилися одночасно

в результаті одного катаклізму. Він міг бути спричинений розпадом і падінням фрагментів великого астероїда, який рухався навколо Сонця тією ж орбітою, що й Марс. Аналіз отриманих даних показав, що він міг мати до 1000 км у діаметрі.

Внаслідок такого зіткнення полюси могли змститися майже на 90° і опинитися поблизу колишнього екватора. Тобто, розташування порід і форма Марса тоді могла досить швидко і сильно змінитися. Це продовжувалося й пізніше за рахунок різних внутрішніх процесів, вулканічної активності [118], численних розломів кори. Також, через близькість до Головного поясу астероїдів, доволі висока імовірність могла бути для зіткнення Марса з залізним астероїдом. Топографічні дані про поверхню Марса і особливості кратера Хеллас вказують на те, що у минулому Марс катастрофічно зіткнувся з астероїдом великих розмірів. Судячи по глибині і профілю кратера Хеллас, матеріал «снаряда», що вдарив по Марсу, мав велику густину. Тому є висока вірогідність того, що Марс зіткнувся з астероїдом, що майже цілком складався із заліза.

На користь цього говорять наслідки топографічних особливостей Марса. Дослідження показують, що при зіткненні планети з залізним астероїдом могла утворитися потужна ударна хвиля, яка добігла аж до протилежної півкулі; сферична форма планети сфокусувала цю хвилю симетрично до кратера Хеллас, і привела до утворення, у тому числі, й найвищого в Сонячній системі вулкана Олімп [145].

За знімками КА «Марс Експрес» зробили тривимірну реконструкцію вулкану Олімп на поверхні Марса (Рис. 1.1). Там чітко видно межі виходу речовини кори, ніби вичавленої фронтом ударної хвилі як своєрідним «поршнем» із середини планети. Тоді ж утворилися численні розломи кори та глибокі долини Марінера.

Зсуви поверхні при проходженні ударної хвилі могли викликати численні марсотруси, набагато сильніші від земних. Поза сумнівом, якщо життя на Марсі до катастрофи й було, то такі потужні землетруси стерли б навіть його сліди.

Рівнинні поверхні, які зображені синім і зеленим кольором на карті на Рис. 1.2, могли утворитися за участю води океанів, яка відбила б ударну хвилю, забрала б частину сумарного імпульсу та ослабила руйнування дна.

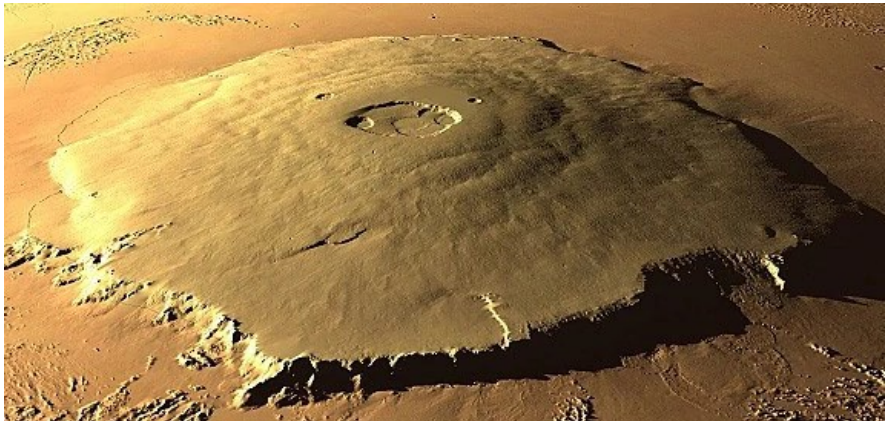


Рис. 1.1. Навколо вулкана Олімп видно межі виходу речовини з кори (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Крім того, на поверхні Марса у північній півкулі виявлено сліди водної ерозії типу русел річок і промитих водою каньйонів. Тоді як рельєф південної півкулі переважно вкритий викидами з кратера Еллада. Поблизу нього можливі свідчення життя виявилися

б похороненими кілометровими шарами породи [85, 116]. Вдалині від епіцентру вибуху такі шари могли складати всього кілька метрів. Цього може бути достатньо для того, щоб перетворити пошуки залишків життя на археологічні експедиції, які вимагатимуть застосування важкої землерийної техніки.

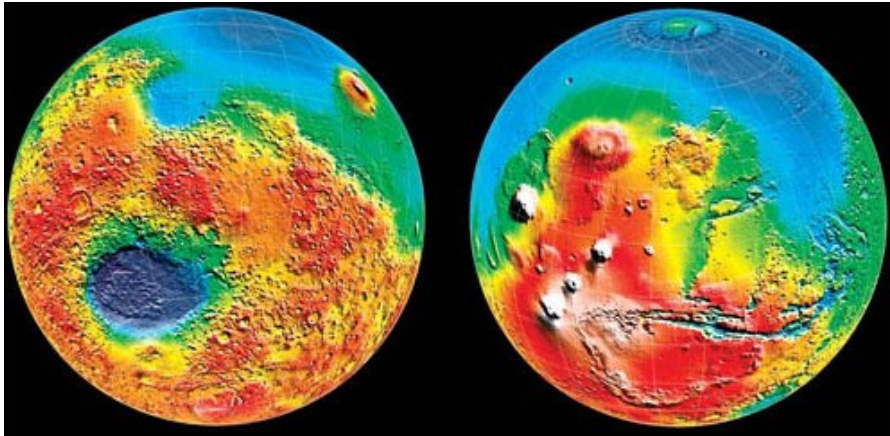


Рис. 1.2. Топографічна карта Марса, отримана в результаті роботи КА «Марс Глобал Сервейор» (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Реконструйовані параметри кратера Хеллас свідчать, скоріше всього, про залізний склад астероїда – винуватця марсіанської катастрофи. Глибина воронки достатньо велика для того, щоб у викидах з неї могли опинитися породи, характерні на Землі для значних глибин. Окислення заліза астероїда у формі його гарячої пари могло практично миттєво вивести з атмосфери Марса майже весь кисень. Викинуті породи кори Марса мали суттєво меншу температуру. Тому вже їх окислення виявилось заблокованим відсутністю кисню.

Це підтвердилось і повідомленнями з марсоходів у січні 2004 р. про виявлення на поверхні Марса таких мінералів як хризоліти й олівіни. Наприклад, хризоліти на Землі через окислення в поверхневих породах представлені мало, а на Марсі вони присутні в значних кількостях. Олівіни ж – типові глибинним породам і на Землі. Такі глобальні зіткнення вплинули на щільність атмосфери і загальний клімат на Марсі. По розрахунках, до цієї події, тиск атмосфери міг бути до 400 мбар. Зараз же – максимум 12 мбар у найглибших місцях.

Тоді на Марсі могла бути вода у відкритих водоймах і навіть річки, що впадали у достатньо крупні моря, особливо в північних низинних областях [101, 120]. Могутнє зіткнення повинне було за відносно невеликий проміжок часу привести до того, що Марс позбувся майже всіх запасів води на поверхні, перетворившись на безводну пустелю.

Свідченням цього можуть бути реліктові залишки стародавніх полярних шапок у вигляді темних областей в екваторіальних широтах. Деякі з них можуть містити запаси льоду, приховані в надрах Марса і в наші дні. У разі підтвердження, така теорія може здійснити значний вплив на подальші наукові місії. В давнину після зникнення рідкої води з поверхні основним її джерелом стали полярні шапки. І якщо поклади льоду ще залишилися під поверхнею Червоної планети, то тепер шукати їх потрібно і в екваторіальній області. Тобто близько 4-4.5 млрд років тому Марс міг бути вологою планетою.

Дослідження мінералів, зібраних на поверхні Марса, показує, що червона планета за весь період свого існування пройшла як мінімум три масштабні геологічні ери. Ґрунтуючись на даних, зібраних марсоходами й супутником «Mars Express», вдалося відновити ці етапи розвитку Марса [10, 112, 146].

В першу Phyllosian геологічну еру, яка розпочалася 4.5 млрд. років тому та тривала понад 500 млн. років, Марс був дуже вологою планетою, тому що породи, що належать до неї, зазнали значної ерозії. Вони містять глинисті мінерали філосилікати, шамозит і контроніт, для утворення яких потрібно багато води, температуру дещо вищу за 273K і низьку кислотність.

Зараз виявлено тисячі розкиданих по всій планеті ділянок з такими породами, які зазвичай містяться під молодшою вулканічною породою, але в багатьох місцях виходять на поверхню.

Після глобальної зміни клімату, імовірно викликаної вулканічною активністю, почалася нова Теїкіанова (Theikian) ера, що тривала від 4 до 3.5 млрд. років тому. Через потужні вулканічні викиди в атмосферу поступала велика кількість сірки, тому навколишнє середовище стало дуже кислим, а вода, вступаючи в реакцію із сполуками сірки, утворювала сульфати. Планета почала осушуватися; свідченням цього є присутність гіпсу й гематиту.

Близько 3.5 млрд. років тому почалася третя, так звана Siderikan ера. Тоді утворилися залізні окисли, які не гідратуються, та можуть надавати планеті червоного кольору. І хоча зараз Марс – це пустеля, проте ще 4 млрд. років тому тут вивергалися численні вулкани, на полюсах лежали товсті крижані шапки, планету окутувала щільна газова атмосфера, а вода у вигляді дощів і снігу живила озера й моря. За різними оцінками це могло тривати від 500 млн. до 1.5 млрд. років. Умови на планеті були такими ж, як і на тодішній Землі.

Проте пізніше ситуація почала змінюватися, планета поволі охолоджувалася, знизилась активність вулканів і зменшився викид газів в атмосферу.

Марс майже у два рази менший Землі. Тому менша сила тяжіння не змогла утримувати легші елементи, присутні в повітрі, і вони зникали в космосі. Залишалися важчі елементи, такі, як діоксид вуглецю, якого зараз у марсіанській атмосфері міститься понад 95%. Вода частково випаровувалася, частково збереглася у глибині, де зараз і ведуться її пошуки. Однак, мабуть, ще впродовж мільярда років на поверхні планети могли зберігатися численні озера.

2. Теплові властивості поверхні Марса.

Марс – перша після Землі планета Сонячної системи, до якої людина виявила інтерес із надією, що там є розвинене неземне життя. Планета Марс обертається навколо Сонця по орбіті з великою піввіссю понад 1.5 а. о. та ексцентриситетом понад 0.09. Тому умови його спостереження з поверхні Землі залежать від близькості до точок перигелію і афелію [118]. Тривалість сидеричного року становить майже 687 земних діб. Через значний ексцентриситет мінімальна відстань між Землею і Марсом кожен приблизно 770-790 днів (синодичний період обертання), у протистояння – змінюється від 55 до 101 млн км. При наземних спостереженнях на поверхні Марса видно світлі і темні деталі [62]. За їх переміщенням вдалося визначити період його прямого обертання навколо осі ($24^{\text{h}}37^{\text{m}}22.6679^{\text{s}}$). У полярних областях спостерігаються дуже світлі полярні шапки, розміри яких змінюється з часом. Там зареєстрували ще й дуже короткоживучі деталі. Одні з них, протягом кількох днів спостерігали над материками; їх фотометричний контраст збільшувався при зменшенні λ ; тому вважали, що вони мали конденсатну природу. А інші деталі переважно появлялися над морями в довгохвильовій ділянці спектра. Тому їх ототожили з пилом, і ці хмари назвали пиловими [63]. В основному, час їх життя обмежувався днями. Проте часом, їх розміри швидко збільшувались. І тоді вони закривали майже всю поверхню планети.

Біля поверхні Марса мінімальні значення температури були зареєстровані над зимовою північною полярною шапкою, у 134К. При такій температурі конденсується навіть основний компонент атмосфери [91, 98] цієї планети – вуглекислий газ. У найтепліших районах Марса – біля озера Фенікс, на плато Сонця, та й у деяких інших областях – добовий перепад температур становить від 220К до 295К влітку, і від 170К до 230К – взимку. Тобто, на Марсі – переважно дуже холодно. Температурні показники там суворіші, ніж, наприклад, на поверхні Землі в Антарктиді. Але в Антарктиді при температурах марсіанських полярних областей зараз живуть люди. Саме там зареєстрована і найнижча температура на Землі, у 191К.

Отже, сама по собі суворість кліматичних умов на Марсі не виключає можливості наявності на ньому життєвих форм [108]. Тим більше, що згідно попередніх оцінок, в атмосфері Марса виявлено метан з відносною концентрацією 10^{-8} .

Цей результат має важливе значення для розуміння фізико-хімічних процесів в атмосфері, циклу води [135], а також для пошуків можливого життя на планеті Марс [108]. Джерелом цього метану можуть бути як біогенні, так і не біогенні процеси.

Сюди можна включити мікроорганізми під поверхнею, які існували у минулому, або ж існують і зараз, геотермальну активність, зіткнення з кометними ядрами і т. п. Мінімальні значення метану спостерігаються в області Фарсіда, а максимальні – на рівнинах Хеллас та Isidis [7]. Вимірювання теплового потоку Марса у вікні прозорості земної атмосфери на $\lambda=8-14$ мкм були започатковані ще у протистояння 1922 р. [84]. Ці й подальші спостереження дозволили встановити, що темні деталі на поверхні Марса на 5-10К тепліші від світлих; мінімальне значення температури спостерігалось вранці та збільшувалося більше ніж на 50К через 1-2^h після полудня; також температура істотно змінюється з широтою та з порою року; всі зареєстровані значення температури на поверхні Марса знаходились у межах 134-310К; середня температура освітленої частини диска на середній відстані від Сонця становить близько 230К.

Відзначимо, що для так званого «середнього» Марса при болометричному альбедо $A=0.26$, значення ефективної температури розраховували у 194 К в афелії і 220 К у перигелії.

Ці значення добре співпадають із спостережними величинами. В [64] проаналізовані радіометричні вимірювання Марса наземними засобами і оцінено

значення теплової інерції світлих деталей рівне 0.004-0.005; для темних – воно дещо більше. Найгрунтовнішу інформацію щодо теплових властивостей поверхневого шару Марса було отримано за допомогою космічних експериментів, започаткованих в 1969 р. на космічних апаратах “Марінер-6, -7”.

На них було встановлено радіометри, які виконували вимірювання у двох інтервалах довжин хвиль: 8.1-12.5 і 17.9-25.1 мкм. Тоді дослідили до 2% марсіанської поверхні з просторовою роздільною здатністю кращою від 50 км; у тому числі й у практично недоступних для наземних спостерігачів районах Марса. Максимальне значення яскравісної температури в довжині хвилі 10 мкм (біля 300K) спостерігалось в морі Сіртис Майор, а мінімальне (148K) – на південній полярній шапці.

Під час роботи космічного апарата «Марінер-9» в 1971-1972 рр. було досліджено майже 35% поверхні з просторовою роздільною здатністю 15-100 км та приблизно 1K по температурі [4]. За цими даними середнє значення болометричного альбедо оцінили в $A=0.25$, а значення теплової інерції – як $K'=0.007$. Найбільше значення $K'=0.011$ відповідало області Хеллас, а найменше (0.005) – області Фарсїда.

Окремо поставало завдання пошуку активного вулканізму [112, 135], яке базувалась на спостереженнях з найкращою просторовою здатністю на широтах від 40°S до 60°N. Було отримано кілька сотень місць, для яких температура відрізнялась від температури довкілля на 4K, та 27 місць – на 8K і більше.

Однаке ці відхилення можна було пояснити лише зміною відбивної здатності та теплової інерції. Тобто, відпадала потреба вводити припущення про внутрішні джерела тепла. Крім того, була знайдена кореляція між температурою, та глобальним нахилом деталей. Але найфундаментальніші на той час дослідження теплових властивостей Марса (з роздільною здатністю 8-170 км) були проведені під час майже трирічних місій «Вікінг-1, -2». На них теплове випромінювання вимірювалось у 28-ми спектральних інтервалах; а за типом приймачів вони були згруповані у 5 діапазонів (6.1-8.3, 8.3-9.8, 9.8-12.5, 14.56-15.41 та 17.7-24 мкм), які, відповідно, позначили T₇, T₉, T₁₁, T₁₅ та T₂₀. Вимірювання в діапазонах T₇, T₉, T₁₁ та T₂₀ відносились до поверхневого шару.

Діапазон T₁₅ був зцентрований на смугу поглинання вуглекислого газу. А тому його спостережні дані призначались для вивчення температури атмосфери. Три приймачі вимірювали теплові потоки в перших двох діапазонах та сім – у третьому й п'ятому.

Паралельно з цими дистанційними вимірюваннями з посадочних модулів цих же місій, велись вимірювання в шарі атмосфери біля поверхні. Крім того, один з приймачів у семи каналах вимірював інтенсивність дифузно відбитого Марсом випромінювання в інтервалі довжин хвиль 0.3-3.0 мкм. Це дозволяло оцінювати болометричне альбедо, та побудувати теплові карти поверхні Марса [61]. Час теплових вимірювань співпадав з літом у північному полярному районі, та із зимою – в південному.

Мінімальне значення температури північної полярної шапки тоді оцінили в 200K а південної – у 127K при значенні болометричного альбедо 0.40. Це дало підставу зробити висновок, що залишкова полярна шапка в північному районі представляє собою покрив водяного [100, 103, 116] льоду. Тоді як для південного району – добавляється ще й помітна кількість сконденсованої вуглекислоти. Ці результати знайшли підтвердження й на основі аналізу пізніших теплових спостережень з космічних апаратів «Вікінг-1, -2» в 1977-1978 рр. Розподіл теплової інерції K' по поверхні планети між широтами 60°N та 60°S [79] також показав добре помітне зонування ґрунту [85, 101] на поверхні по довготі.

Було отримано, що градація зі значенням K' менше 0.004 притаманна лише трьом локальним районам, які зв'язані з високо-альбедними (більше 0.25) деталями. Найменший з них відповідає області Elisium Mons, а найбільший – Amazonis Tharsis.

Крім того, було встановлено, що всі ділянки зі значеннями $K' \leq 0.0015$ відповідають найвищим деталям у районі вулканічної структури Olympus Tharsis. Серед

ділянок зі значенням $K' \leq 0.004$ максимальне значення K' збільшується від 0.002 до 0.003 при зменшенні висоти деталі від 10 до 0 км. Найбільші значення K' відповідають впадинам на планеті.

За даними спостережень цих же деталей в нічний час [146], побудували теплові карти нічної температури в межах широт від 10°S до 50°N . Виявилось, що границі холодних деталей, а також деяких локальних температурних аномалій корелюють з виходами порід з низьким альбедо та з підвітряними сторонами кратерів. У свою чергу, теплові аномалії, а значить і різноманіття значень для коефіцієнта теплової інерції, можна пояснити зміною розмірів частинок, які вкривають поверхневий шар [120] планети в даному регіоні. У подальшому практично всі орбітальні апарати, які тривалий час перебували на орбіті Марса, здійснювали систематичні спостереження теплового випромінювання. На Рис. 2.1 та 2.2 приведені максимальні денні (о 14 годині локального часу) і мінімальні нічні (о 2 години локального часу) температури, які були отримані за допомогою космічного апарата «Марс Глобал Сервер» протягом одного марсіанського року з 01.06.2000 по 18.04.2002.

Що стосується спектральної залежності температури, то в усьому тепловому діапазоні вона дещо зменшується зі збільшенням довжини хвилі [145]. Значний інтерес викликали також зображення поверхні Марса (Рис. 2.3), отримані космічним апаратом «Mars Odyssey» за допомогою Thermal Emission Imaging System (THEMIS). Передані на Землю зображення у видимій і в інфрачервоній областях спектру були призначені для визначення мінерального складу марсіанського ґрунту. Очікувалося, що апаратура THEMIS допоможе визначити місцезоположення відкладень, походження яких може бути пов'язане з гідротермічними процесами.

Можливо, що вона могла б допомогти визначити райони активної вулканічної діяльності (якщо такі все ще є на Марсі). Так, на поверхні в районі долини Хеллас на знімках з камерою THEMIS апарату «Mars Odyssey» було зареєстровано кілька точок з температурою приблизно на 10 К вищою за температуру навколишньої поверхні, незалежно від часу доби і від того, чи освітлені вони Сонцем, чи ні.

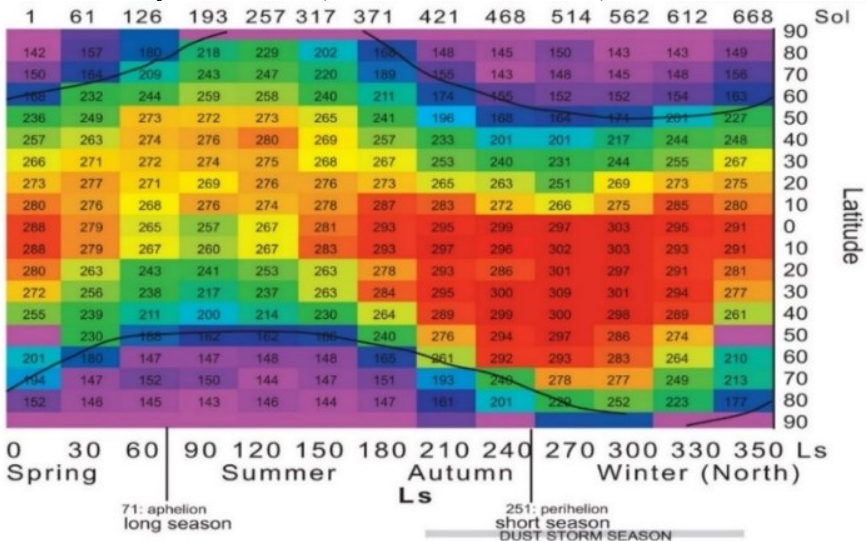


Рис. 2.1. Максимальні денні (о 14 годині локального часу) температури протягом марсіанського року 01.06.2000-18.04.2002 (<http://www.jpl.nasa.gov/>).

Була висловлена думка [10] про те, що причиною таких температурних аномалій може бути термальна, або вулканічна активність; і це приводить до викидів водяної пари у цих місяцях. Поряд зі спостереженнями в тепловій ділянці накопичено досить багато спостереженого матеріалу в радіодіапазоні. Вимірювання теплового потоку в радіодіапазоні були розпочаті в протистояння 1956 р. спостереженнями в довжині хвилі 3.15 см.

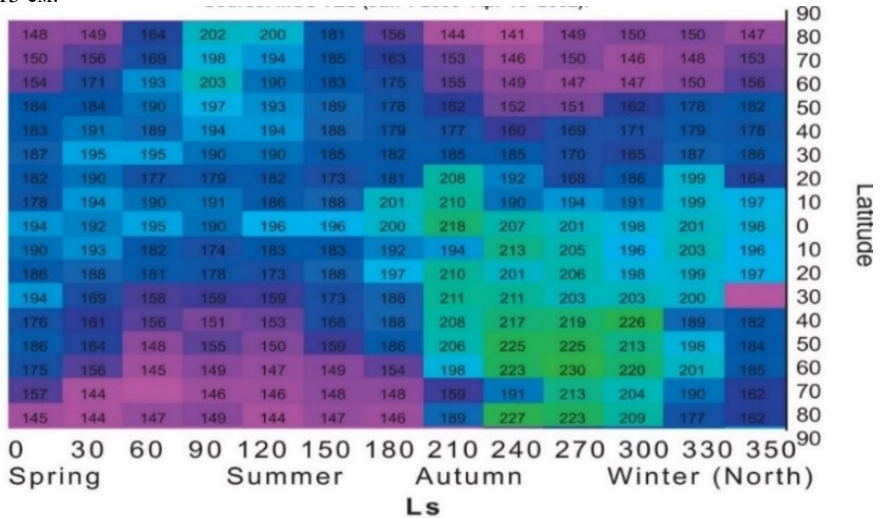


Рис. 2.2. Мінімальні нічні (о 2 годині локального часу) температури протягом марсіанського року з 01.06.2000 по 18.04. 2002 (<http://www.jpl.nasa.gov/>).

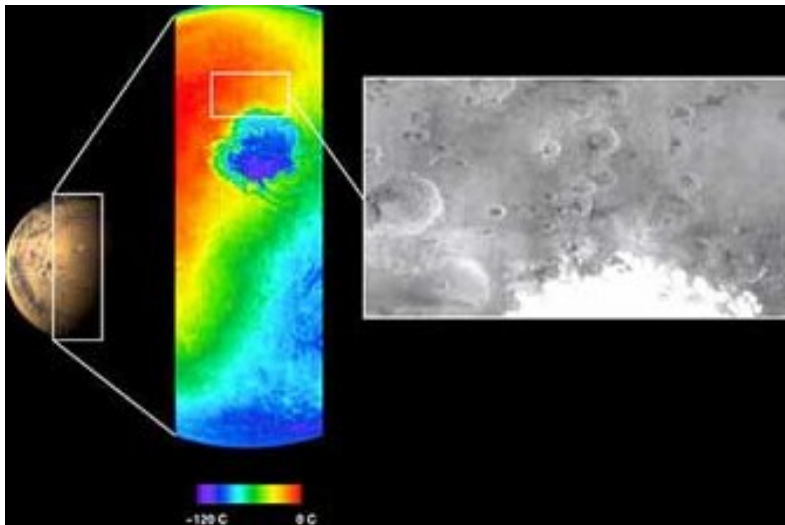


Рис. 2.3. Теплова карта поверхні. Видно освітлену і неосвітлену Сонцем поверхню і край полярної шапки (<https://mars.nasa.gov/resources/1863/first-themis-image-of-mars/>).

Пізніше отримали інформацію про значення яскравісної температури в діапазоні довжин хвиль 0.12-21.3 см. Основні результати цих спостережень зводяться до наступного: спостережна інтенсивність радіовипромінювання погоджується з очікуваною при температурі, яка перевищує глибину проникнення добових варіацій температури; яскравісна температура в радіодіапазоні показує довготну залежність [43]. Амплітуда зміни температури зі зміною умов освітлення менша ніж в тепловій ділянці спектра та зменшується зі збільшенням довжини хвилі.

За даними цих спостережень були оцінені значення діелектричної проникності ϵ (в межах 2.2-3.4), густини ґрунту ρ (1.0-1.9 г/см³), коефіцієнта теплової інерції K' (0.005-0.006), глибини проникнення радіохвиль (1.8-3.0 см). А з борту космічних апаратів «Марс-3, -5» проводились вимірювання, за якими визначались величини діелектричної сталої, а вже за ними – ще й густини ґрунту. Виявилось, що максимальне значення густини було 4 г·см⁻³, а мінімальне – приблизно 1 г·см⁻³.

3. Макрорельєф поверхні Марса.

Космічний апарат «Mars Global Surveyor» був оснащений лазерним висотоміром з середньою точністю вимірювань 13 м, а на рівних поверхнях – до 2 м. З його допомогою було виконано майже 30 млн вимірювань. У результаті цієї роботи була отримана детальна топографічна карта Марса (Рис. 3.1). Гори на ній жовті й коричневі, а западини зелені й сині. Дана карта виконана методом пошарового забарвлення з 21 ступенем висот між горизонталями. Ці, отримані зондом «Mars Global Surveyor» знімки, дозволяють розрізнити деталі на поверхні планети розміром у кілька десятків метрів.

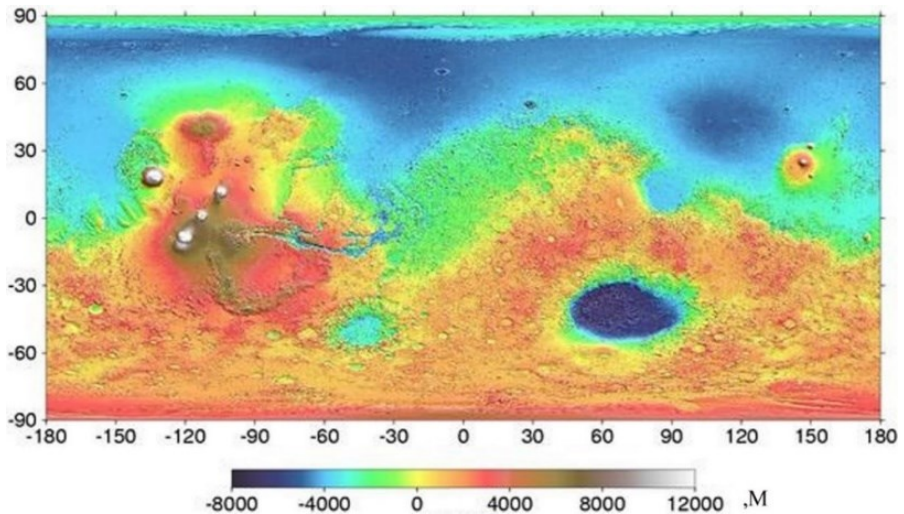


Рис. 3.1. Детальний рельєф Марса за даними космічного апарата «Mars Global Surveyor» (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Нові висотні відмітки відлічуються від екіпотенціальної поверхні тривісного еліпсоїда обертання з наступними параметрами: довжина осей еліпсоїда $A=3398.627$ км (1°N , 72.4°E); $B=3393.760$ км (0°N , 342.4°E); $C=3376.200$ м (широта 89°N , 252.4°E); стиснення рівне $1/169.8$; середній радіус 3389.508 км; середній екваторіальний радіус 3396.200 км; північний полярний радіус 3376.189 км; південний полярний радіус 3382.580 км. Нова карта Марса виконана методом пошарового забарвлення з 21 ступенем висот між горизонталями. До висоти 8 км перетин рельєфу йде через 1 км. Від 8 до 12 км – через 2 км. Вище 12 км кольором показаний один ступінь з висотними відмітками вершин [10]. Знімки Марса, отримані зондом «Mars Global Surveyor», дозволяють розрізнити деталі на поверхні Марса розміром у десятки метрів.

Отримані за допомогою лазерного альтиметра й панорамної камери високої просторової роздільної здатності, установлених на борту «Mars Global Surveyor», виявили той факт, що пошарова будова верхньої кори є загальною властивістю планети. Так, у Valles Marineris (Рис. 3.2) вона простежується до глибини ~ 10 км. Ця величезна рифтова долина на сході від області Фарсіда простягається більше, ніж на 4000 км в екваторіальній області Марса при максимальній ширині близько 700 км і глибині місцями до 7 км. Вона розташовується майже від 20° до 100°W у широтному поясі між екватором і 15°S .

Отримані дані показують, що рельєф північної і південної півкуль Марса помітно розрізняються. Велику частину північної півкулі займають порівняно гладкі рівнини:

Велика Північна Рівнина тягнеться від північної полярної області, переходить у західній півкулі в рівнини Аркадія Planitia, Амазонія Planitia, Chryse Planitia і Ацидалійську, а в східному – в Utopia Planitia, Елізій Planitia та Ісіда Planitia. Рівнини північної півкулі лежать нижче середнього рівня поверхні планети. Наприклад Велика Північна Рівнина, Рівнина Утопія і Ацидалійська Рівнина мають глибину від 4 до 5 км. Planitia Аркадія, Амазонія й Chryse Planitia розташовані вище на 1 км. Западини на Марсі подібні до океанічних западин на Землі. Ці області Марса різні за походженням, віком і зовнішнім виглядом. У процесі формування північних рівнин важливу роль відігравав, мабуть, підповерхневий лід. Тобто, у північній півкулі переважають поверхні заглиблені на 2-5 км; ці рівні – відповідають рівнинним територіям.



Рис. 3.2. Valles Marineris (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

У південній півкулі в основному поширені припіднятіості на висоти від 1 до 3 км. Рівнин там порівняно мало і вони не такі обширні, як у північній півкулі. Це Hellas Planitia і Argyre Planitia; вони мають округлу форму. Ймовірно, вони утворилися в результаті падіння на Марс крупних тіл. Велика частина південної півкулі представлена підвищеннями, покритими безліччю кратерів.

Середні висоти материкової частини Марса складають 3-4 км. Так, Плато Сірія розташоване на висотах 5-6 км, Плато Сінай – 3-5 км, Плато Сонця – 3-4 км тощо. Поблизу екватора знаходиться найкрупніша височина – Фарсіда, заввишки до 8 км. Ще вище підносяться розташовані на одній лінії три погаснувші вулкани: Аскрійський, Павлін і Арсія. Височину Фарсіда оточує обширна система розломів. Крутизна схилів деяких каньйонів тут досягає 20°. На західній околиці Valles Marineris знаходиться унікальна система долин, яку назвали Лабіринт Ночі.

Часто зустрічаються долини, схожі на висохлі русла, які можуть свідчити про те, що в минулому на поверхні Марса існували могутні водні потоки. Більшість таких протяжних долин розташовані в зоні поруч з екватором. І лише окремі з них зустрічаються в середніх широтах.

Обробка збурень орбіт космічних апаратів дозволила одержати об'ємну карту своєрідної рівневої поверхні Марса, яку називають ареоїд. Виявилось, що ця поверхня добре корелює з видимим рельєфом Марса. Особливо помітно на ній вирізняється Olympus Mons. Рівень ареоїда оточує гору западинами глибиною 300-400 м. Всередині гори рівень ареоїда піднімається на висоту до 500 м. У середньому гравітаційні аномалії на Марсі перевершують гравітаційні аномалії на Землі в 17 разів.

Поверхня Марса значно відрізняється по окремих регіонах, та й геологічні процеси також є дуже різноманітними. Для всієї поверхні планети характерною є глобальна асиметрія у розподілі знижених ділянок, якими є рівнин, і котрі становлять майже 35% увід сієї поверхні, а також із піднесених областей, вкритих безліччю кратерів різних типів.

Переважаюча частина рівнинних областей розташована у північній півкулі. А межа між областями в деяких випадках представлена дуже особливим типом рельєфа, названим столовими горами, що складаються із гір і хребтів із плоскими вершинами. Стародавні високогір'я, що покривають значну частину південної півкулі, відрізняються від значно молодших рівнин у північній півкулі.

Крім того, кратерів на півночі знайдено значно менше. На всій поверхні планети дуже вирізняється область Фарсіда, котра у середньому припіднята майже на 4 км та займає близько 15% всієї площі планети.

Якраз на області Фарсіда розташовані щитові вулкани гігантських розмірів. Один із них – Olympus Mons – це найбільший вулкан у всій Сонячній системі. Ці особливості вказують на те, що поверхня Марсу характеризується дихотомією, за якої південна півкуля є древнішою та вкрита кратерами, і вона є припіднятою; тоді як північна півкуля на значно більших площах укрита рівнинами і опущена сильніше. Вважають, що походження багатьох каньйонів пов'язане зі стародавньою тектонікою Марса; тобто із рухом окремих плит в марсіанській корі кілька мільярдів років до цього часу. Центральна частина області каньйонів – це величезний прямолінійний рифт, який сформувався при розколі кори. До заходу даний рифт переходить в широкую область гіллястих каньйонів, яка названа Лабіринтом Ночі.

В східній частині Valles Marineris центральний рифт граничить з обширною областю дуже хаотичної місцевості; саме звідси беруть початок кілька найбільших долин, котрі надалі йдуть на північ та падають там у Chryse Planitia.

Характерними деталями марсіанської поверхні є так звані каньйони та руслоподібні канали (Рис. 3.3), які в деяких випадках супроводжуються ланцюжками кратерів різних діаметрів (Рис. 3.4), та які пов'язують з можливим існуванням в далекому минулому на Марсі рідкої води.

Розподіл висот на поверхні у Східній та Західній півкулях Марса вказує на те, що у середньому Західна півкуля є дещо вищою від Східної. Площі поверхні, зайняті рівнинами, є практично однаковими в обох цих півкулях. Причому, в східній півкулі також існує вулканічна область, яку назвали Elysium Planitia. На ній розташовані три вулкани. І найбільший із них – Elysium Mons – має близько 150 км у поперечнику та висоту у маже 14 км. Також є окремі вулкани невеликих розмірів і в регіонах Марса.

Марсіанські ударні кратери відрізняються від кратерів Місяця й Меркурія меншою глибиною і слідами вітрової і водної ерозії. Найбільшими з них є такі: Гюйгенс (діаметр 470 км, глибина близько 4 км), Скіапареллі (діаметр 465 км, глибина 2 км), Кассіні (діаметр 411 км, глибина 1 км), Антоніаді (діаметр 410 км, з нульовим рівнем поверхні), Тихонравов (діаметр 380 км, глибина 2 км); Ньютон (є найглибшим зі значенням глибини близько 5 км).

Деякі молоді марсіанські кратери відрізняються радіальними потоковими викидами ґрунту в місцях можливого танення льоду під поверхнею. Такі викиди ґрунту частіше зустрічаються у кратерів, розташованих на північних рівнинах. Побудовані гіпсометричні карти виявили ряд цікавих особливостей форм рельєфу Марса.

Наприклад виявилось, що відомі плато Сірія, Сінай, Дедалія і Сонце – насправді зовсім не рівні плато, а знаходяться на глобальному схилі.

Якщо уявно розділити планету великим колом, нахиленим на 35° до екватора, то між двома такими півкулями Марса також існують помітні відмінності в характері поверхні.

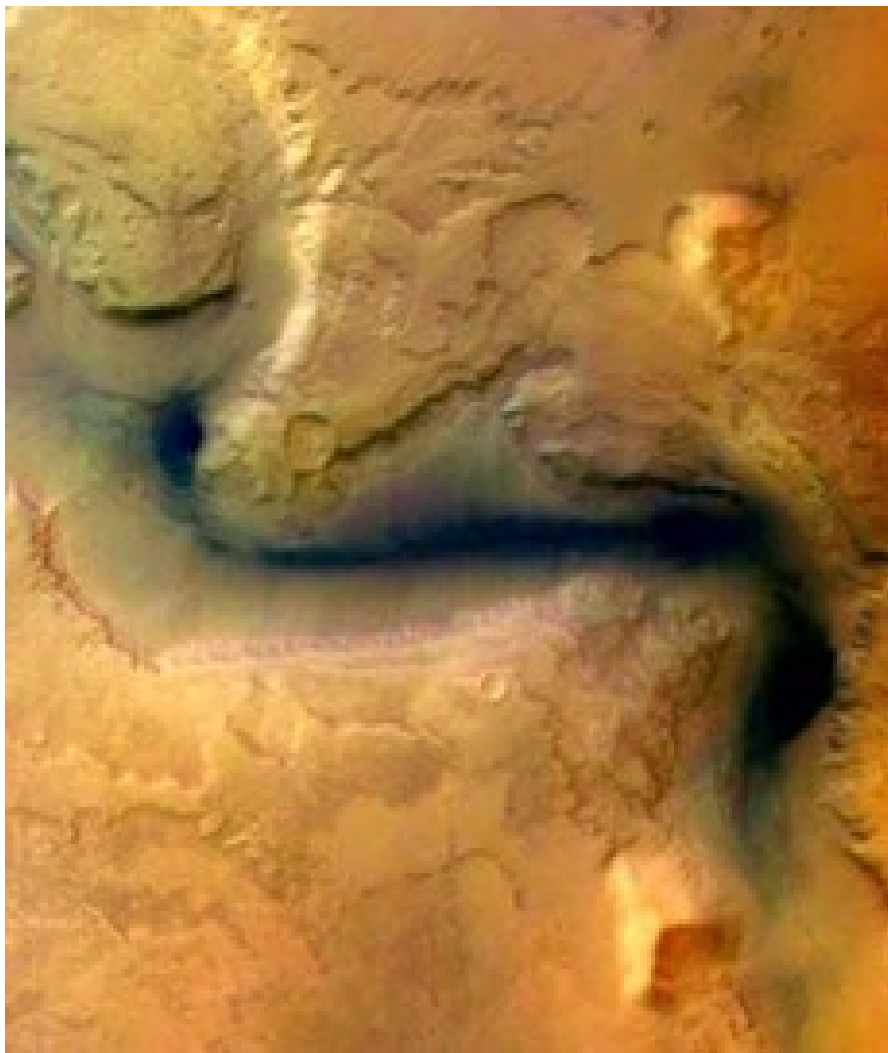


Рис. 3.3. Ліворуч – «русло річки» біля південного полюса Марса (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Південна частина – має переважно древню поверхню, сильно пориту кратерами. Саме в цій півкулі розташовані головні ударні западини – Hellas Planitia, Argyre Planitia та Isida Planitia.

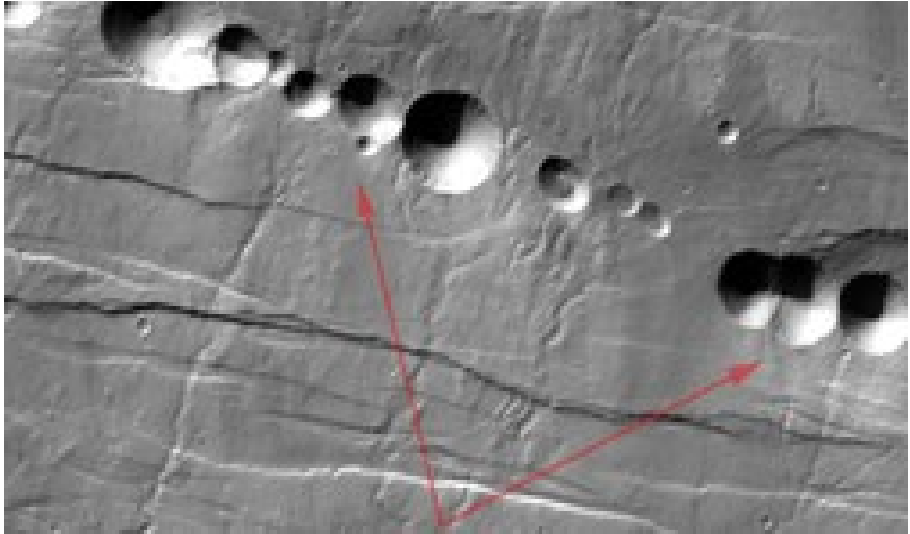


Рис. 3.4. Ланцюжок кратерів Acheron (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

На півночі домінує молодша з малою кількістю кратерів поверхня. Значна частина поверхні Марса представляє собою світліші ділянки, названі «материками»; вони мають червоне та жовтогаряче забарвлення; 25% усієї поверхні – це темні «моря» сіро-зелених на Рис. 3.1 кольорів; їх рівень поверхні нижчий від «материків». Перепади висот там досить значні й становлять в екваторіальній області до 14-16 км; але є й вершини зі значно більшою висотою. Найвищі області – це вулканічні куполи гір на плато Фарсіда й Elysium Planitia. Хоча ці вулкани, очевидно, вже не є діючими, вони, ймовірно, утворилися раніше й були активними набагато довше, ніж будь-які вулкани на Землі.

Крім того, дещо менша сила тяжіння могла дозволити виверженій речовині створювати на Марсі значно вищі структури, котрі не розпадалися під дією власної ваги. Найбільший з гігантських погаслих вулканів – Olympus Mons, розташований на північно-західній окраїні плато Фарсіда, має підшву діаметром до 900 км і кальдеру на вершині поперечником до 90 км.

Ще три вулкани – Askraeus, Pavonis і Arsya розташовані практично на одній прямій на вершині Tharsis Continent з висотою близько 9 км. Самі вулкани піднімаються над Tharsis Continent ще на 17 км. Інший район древніх вулканів – Elysium Planitia – піднімається над навколишнім пейзажем на 5 км. Це є величезною вулканічною рівниною із поперечником більшим від 5000 км.

До того ж, на Марсі було знайдено ще більше 70 недіючих зараз вулканів. Проте всі вони є значно меншими як за площею, так і за своєю висотою. Серед обширних областей на Марсі вирізняються й ряд інших. Це, наприклад, Solis Planum, що представляє собою древню вулканічну рівнину, яка лежить на південь від долин Марінера. При візуальних спостереженнях всередині даної області видна темна пляма із змінною формою, яку інколи називали «озеро». По цій причині вся ця структура отримала назву «Марсіанське око».

Після вимірювань, проведених апаратом «Mars Global Surveyor», стало відомо, що Земля Аравія залягає кілометром нижче навколишніх плоскогір'їв. Це може свідчити про те, що регіон у минулому піддавався ерозії. Ерозія могла викликатися різними причинами: льодовиками, вулканічною діяльністю, вітром. Проте величезні розміри цієї

області, яка піддалася впливу ерозії, мають свідчити про можливість того, що процеси ерозії на всій ділянці Землі Аравія скоріше за все були викликані проточною водою.

Певне підтвердження цьому факту було отримано по орбітальних знімках з різних КА у 2006 р. Ще одна обширна кругла ударна западина – Argyre Planitia – має 900 км діаметром і розташована в південній півкулі Марса. Arcadia Planitia – розташована в північній півкулі Марса. Там же знаходиться ще й рівнина великого розміру з невеликою кількістю кратерів – Utopia Planitia. Саме вона була вибрана місцем посадки апарату «Вікінг-2».

Передані на Землю панорамні зображення, отримані зі спускового апарату «Вікінг-2», показували поверхню із безліччю валунів, які складаються із текстурованих порід. Chryse Planitia – представляє собою кругле плато, скоріше всього – ударний басейн. Він розташований у північній екваторіальній області Марса; це формування було вибране місцем посадки іншого зонда – «Вікінг-1».

4. Особливості полярних регіонів Марса

Яскраві полярні шапки на Марсі (Рис. 4.1) були виявлені ще при спостереженнях Джованні Кассіні в 1666 р. Взимку вони простягаються на третину (південна полярна шапка – навіть на половину) відстані до екватора. Завдяки дослідженням різними космічними апаратами, зараз відомо, що верхня частина зимових шапок на обох полюсах складається переважно із замерзлого льоду CO_2 . А постійна багаторічна частина шапки – із водяного льоду [24] – на північному полюсі – відкривається практично повністю і залишається такою протягом усього літа.

Полярна шапка з льоду CO_2 на південному полюсі навіть влітку тоне не вся; там зверху залишається її незначна частина над водяним льодом. Тобто, обидві полярні шапки складаються переважно з водяного льоду із домішками твердої вуглекислоти.

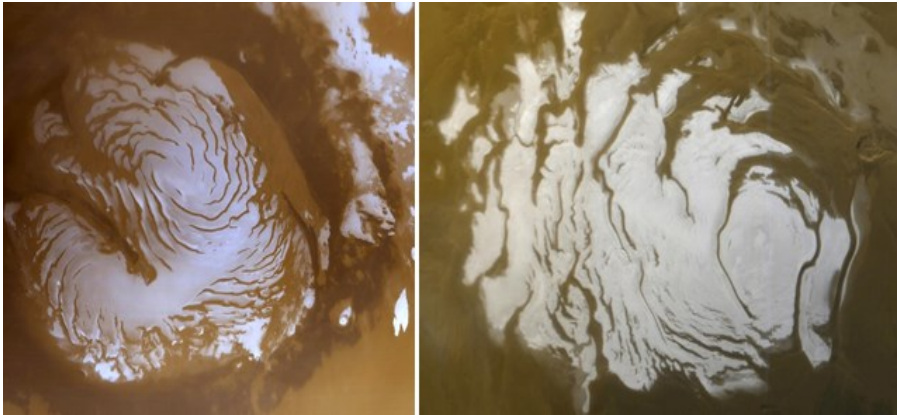


Рис. 4.1. Ліворуч – Planum Boreum поперечником 1100 км в літньому вигляді 13.03.1999. Праворуч – Planum Australe марсіанським літом 17.04.2000 (зображення з «Mars Global Surveyor»).

Навесні ці льоди частково тануть. І тоді від полярних областей у напрямку до екватора видно області потемніння. Раніше їх приймали за марсіанську рослинність та прояв життєвих форм [85, 111, 117]. Але сьогодні відомо, що навіть літом там достатньо холодно [21]. Адже там є замерзлий вуглекислий газ, котрий замерзає при температурі 148 К. А видима смуга темнішого матеріалу, наприклад, навколо Planum Boreum – є піщаними днами (Рис. 4.1, ліворуч).

Уперше підтвердити існування льоду в обох полярних шапках Марса вдалося в час роботи космічного апарата «Mariner-9» [17, 99]. Однак про чистоту та кількість льоду надійно стало відомо у 2004 р. Тоді радіолокатор «MARSIS» на космічному апараті «Mars Express» зміг підтвердити існування доволі чистого водяного льоду у південній полярній шапці. Глибина його залягання перевищувала 3.7 км [78]. Деяко пізніше радіолокатор «SHARAD» на космічному апараті «Mars Reconnaissance Orbiter» зміг «побачити» льодяну основу Planum Boreum на глибині близько 2 км [78].

Згідно сучасних уявлень загальний об'єм постійної частини водяного льоду у полярній шапці північної півкулі, становить майже 1.5 млн km^3 . Проте навіть така кількість льоду у розталому вигляді ніяк не змогла б утворити величезний океан, котрий колись міг покривати майже всю північну півкулю Марса. Вважають, що у стародавні часи до 17 млн km^3 водяного льоду відступило лише у південному навколо полярному

регіоні [146]. Тому пропонується чимало пояснень щодо того, куди ж могла подітися вода, що колись знаходилася на тепер посушливій планеті.

Проведені з різних космічних апаратів радіолокаційні вимірювання показали, що обидві полярні шапки мають значну кількість нашарувань льоду та пилу. Ці шари містять і дані щодо минулих змін кліматичних умов на Марсі. Вивчення цих шарів [4] під час майбутніх досліджень дозволить отримати необхідну інформацію та зрозуміти еволюцію клімату на планеті.

Значно менші крижані покрови знаходять усередині багатьох кратерів, розташованих навколо обох полярних шапок. Деякі з них можуть перебувати під товстим шаром ґрунту та пилу [16].

Цікавим прикладом є кратер Корольов з діаметром 81.4 км (Рис. 4.2). За оцінками, на його дні міститься майже 2200 км³ водяного льоду. Дно цього кратера вкрите постійним шаром водяного льоду глибиною до 1.8 км і діаметром до 60 км. Спектральні дослідження показали, що фотометричний контраст у полярних шапках Марса зростає зі зменшенням довжини хвилі [132]. Ще наземні спостереження показали, що їх протяжність по широті змінюється протягом марсіанського року [135].

Максимальні розміри обох полярних шапок припадають на зиму у відповідній півкулі, а мінімальні – на літо. Але вони повністю не зезають. Мінімальні розміри, відповідно, становлять близько 300 км для південної полярної шапки, та 900 км – для північної. При цьому північна полярна шапка зменшує свої розміри повільніше від південної. Це пояснюється тим, що північне літо припадає на знаходження Марса в афелії орбіти.



Рис. 4.2. Korolev Crater (https://en.wikipedia.org/Perspective_view_of_Korolev_crater.jpg).

Передані космічними апаратами зображення дозволили досить детально вивчити структуру полярних шапок. З їх допомогою були виявлені шаруваті відкладення висотою

200-800 м та нахилами в $(1\div 9)^\circ$. Товщина окремих шарів у цих відкладеннях переважно знаходиться в межах від 12 до майже 50 м. Хоча інколи – спостерігаються й тонші утворення. Згідно дослідженням при наземних спостереженнях і даних з космічних апаратів, клімат у південній півкулі Марса є помітно сухішим, ніж у північній. Пояснюється це тим, що південний полюс майже на 6.5 км вищий північного. Тому такий рельєф значно змінює циркуляцію атмосфери в цій частині планети. Щоліта у своїй півкулі відбувається помітне танення полярних шапок Марса. Випаруваний вуглекислий газ, з якого переважно складається атмосфера планети, із південного полюса переміщується до екватора, і звідти направляється в сторону північного полюса. І вже там – він додається до тієї водяної пари й вуглекислого газу, котрі розташовані над північною полярною шапкою. У результаті виходить, що полярна шапка над північним полюсом за розмірами набагато більша, ніж над південним.

Такий сценарій було отримано при комп'ютерному моделюванні атмосферних потоків на Марсі. Наведені на Рис. 4.3 зображення біля північної полярної шапки Марса вперше показали шари водяного льоду й пилу [61, 62, 64] в перспективному уявленні. Там вдалося виявити майже двокілометрові вертикальні кручі, а також темний матеріал у структурах, схожих на земні кальдери з крутими схилами і рівним дном.



Рис. 4.3. Область біля північного полюса з льодовиками й вулканами (зображення з «Марс-експрес»).

Вважають, що вони могли утворитися внаслідок провалу на вершині вулкана, або ж на прилеглий до нього місцевості [118, 136]. Червоні області на фото – це скельні й піщані ділянки поверхні [91]; білі області – є вкриті льодом ділянки. Склад темних областей може включати в себе вулканічний пил.

Укриті дюнами області можуть складатися із вулканічної золи. Поблизу марсіанського північного полюса космічний апарат «Марс Експрес» виявив чимало вулканічних конусів. Причому деякі з них досягають у висоту 600 м.

Цілком імовірно, що їх можна вважати свідченням зовсім недавньої вулканічної діяльності на Марсі. Рис. 4.4 показує сезонні зміни [196, 97, 105, 113] форми полярних шапок. Вони відбуваються за рахунок змін у верхньому шарі товщиною менше 1 м, котрий складається із твердої вуглекислоти.

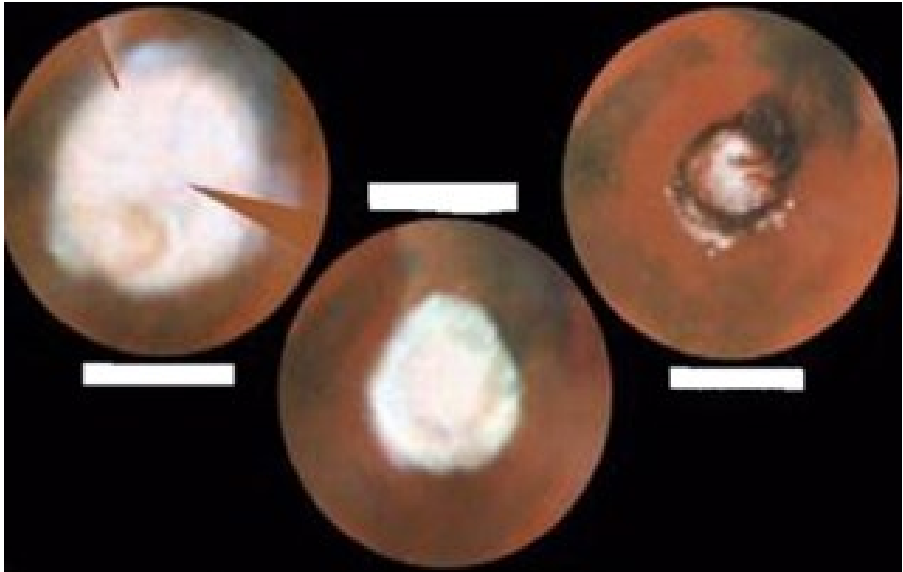


Рис. 4.4. Зображення (зліва направо – 10.1996, 01.1997, 03.1997) демонструють сезонне зменшення північної полярної шапки Марса (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Площа покриття даним шаром, швидко збільшується в зимові періоди, досягаючи широт близько від 50°, а інколи й переходить цей рубіж. Навесні, з підвищенням температури, цей шар, можливо, повністю випаровується і залишається лише постійна частина шапки. Крім сезонних змін форми полярних шапок, має місце ще й зміна їх форми від одного марсіанського року до іншого (Рис. 4.5). Не виключено, що впродовж марсіанської історії шапки могли мінятися місцями. Фактично, питання про відносний внесок обох механізмів у формування асиметричного розподілу води – це питання про відносну роль локального обміну й глобального переносу.

Присутність льоду з води і вуглекислого газу вдалося надійно зареєструвати 18.01.2004 камерою «OMEGA», спектрометрами «SPICAM» та «PFS». Оскільки на момент спостережень навколо південного полюса був кінець літа, то факт, що лід там все ще знаходиться, доказує, що він у цьому місці є постійно. Ця знахідка дала підстави для спростування версії про те, що вода [101] на Марсі повністю випаровується влітку, збираючись на полюсах у вигляді льоду тільки взимку.

У 2005 р. було повідомлено про розгадку ще однієї марсіанської загадки. Тоді вдалося з'ясувати, чому геометричний центр південної полярної шапки Марса зміщений відносно його географічного південного полюса [15] на 150 км (Рис. 4.6, праворуч).

Аналіз зображень, отриманих з космічного апарата «Марс Глобал Сурвеєр», та комп'ютерні моделі клімату по цих даних – показали, що наявне зміщення є результатом дії двох марсіанських регіональних кліматичних зон, які розташовуються з обох боків від південного полюса. Першопричиною появи цих двох кліматичних зон вважають наявність двох величезних кратерів у південній півкулі Марса.

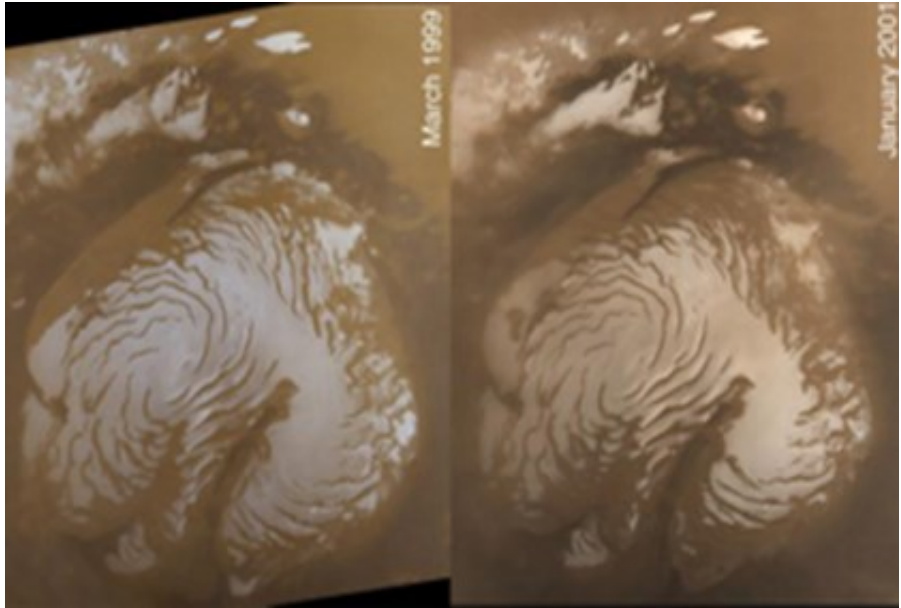


Рис. 4.5. Зміна форми північної полярної шапки за один марсіанський рік; 03.1999 і 01.2001 (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Ландшафти цих кратерів породжують вітри, які створюють і підтримують область низького тиску біля полярної шапки в західній півкулі. Тому, саме кратери підтримують існування зони низького тиску, яка домінує в районі південної полярної крижаної шапки і зберігає її в такому стані. Так, у західній півкулі області низького тиску породжують прохолодну змінну погоду та опади у вигляді снігу.

Саме його можна бачити як дуже яскраву зону на поверхні крижаної шапки. А в східній півкулі часто появляються умови для утворення своєрідної «ожеледиці» через теплішу погоду і відносну ясність погоди у цій частині Марса. Ожеледиця формується тоді, коли поверхня планети охолоджується, але температура атмосфери при цьому залишається відносно високою.

Саме ці факти є причиною існуючої східно-західної асиметрії у формі Південної Полярної шапки на Марсі. Як показали численні розрахунки, гігантські крижані спіралі, виявлені на полярних шапках Марса, можуть бути результатом незвичайного поєднання температури планети, нахилу її осі і розрідженої атмосфери. Ці концентричні завитки довжиною в сотні кілометрів, були вперше відмічені ще з космічного апарата «Вікінг» в 1976 р.

Розрахунками оцінили, що спіральні рукави розходяться приблизно на 1 км за мільйон років. Причому спіралі взагалі не утворилися б, якби не присутність тонкої марсіанської атмосфери. Саме через неї дуже мала кількість тепла передається по планеті повітряними потоками. І внаслідок цього, локалізоване танення лише на одній стороні тріщини є домінуючим механізмом. Приведені на Рис. 4.7 зображення ілюструють одне з погодних явищ, яке повторюється кожен марсіанський рік.

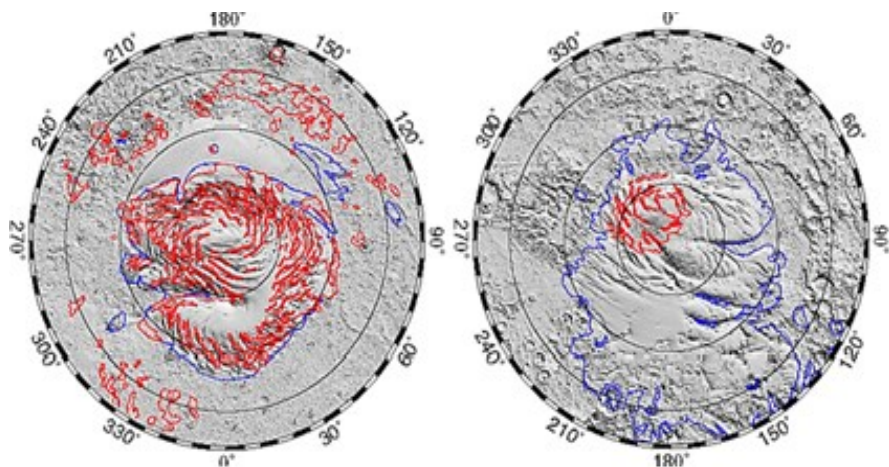


Рис. 4.6. Карты рельефу північної (Ліворуч) і південної (праворуч) полярних областей Марса. Червоні контури показують протяжність крижаних полярних шапок; синім – відмічено контури піднятих частин (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

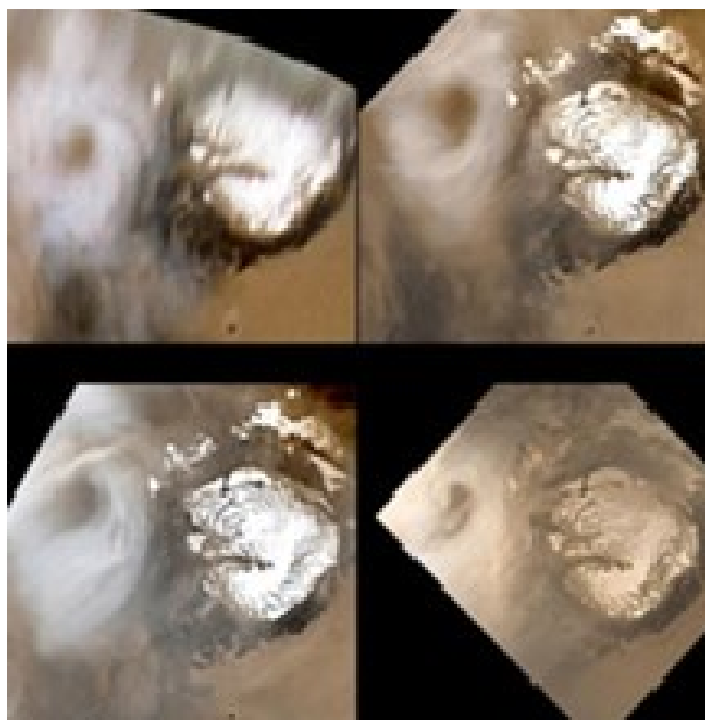


Рис. 4.7. Зображення північної полярної області під час кожного наступного літнього сезону (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

На всіх цих зображеннях показана північна полярна область Марса під час північного літнього сезону. Зображення зроблені з інтервалом приблизно в 1 марсіанський рік. І на кожному з них видно кільцева хмара, що з'являється кожного літа приблизно на одному і тому ж місці полярного ландшафту.

Перше зображення зроблене у квітні 1999 р. телескопом Хаббла, інші – отримані з космічного апарата «Марс Глобал Сервейсер». Ця кільцева хмара з першого погляду може бути прийнята за циклон, або ураган. Але ця хмара не обертається: вона формується вранці, і до полудня, зазвичай, повністю розсіюється.

Згідно деяким припущенням, відкладення водяного льоду циклічно перерозподілялися між північним і південним полюсами Марса протягом останніх 51000 років. Цей часовий проміжок був розрахований по коливаннях осі обертання планети (прецесії). Орбітальні параметри планети 21000 років тому були такими, що коли вона розташовувалася ближче всього до Сонця, то літо було в північній півкулі Марса.

Результати комп'ютерного моделювання клімату показали, що в той час вода над північним полюсом планети перебувала в дуже нестабільних умовах. Вона могла у формі пари легко переміститися до південного полюса, і там знову сконденсуватися на поверхні. Таким чином, на південному полюсі за рік накопичувався шар водяного льоду товщиною до 1 мм. За 10000 років це привело до утворення там шару водяного льоду товщиною до 6 м. Майже 10000 років тому цикл прецесії планети змінився, і почалося її повернення до існуючої в даний час конфігурації.

Водяний лід тепер уже став нестабільним над південним полюсом і вода почала переміщуватися на північ. Однак, відповідно до даних спектрометра «OMEGA», близько 1000 років тому діоксид вуглецю почав намерзати на поверхню, вкриту водяним льодом і, таким чином, блокувати переміщення води до іншого полюса. Зледенілі області навколо північного полюса Марса зараз характерні навіть для середини літа, коли сезонна полярна шапка з CO₂ відкриває водяний лід і ґрунт, що перебувають під нею.

Регулярність розташування окремих шарів також дозволяє припустити їх зв'язок з періодичними змінами орбіти Марса. Можливо, що ці зміни впливають на частоту й силу глобальних пилових бур, і, отже, на кількість речовини, що формує осадові шари планети.

5. Плями навколо полярних областей Марса як сезонні «міні вулкани».

По закінченні зимового сезону на піщаних дюнах, розташованих у південному і північному приполярних районах Марса, з'являються численні павутино-подібні плями. Спеціальні дослідження показали, що ці плями з'являються саме з початком весни, і до літнього сезону вони повністю зникають. Спершу їх появу спостерігають по периметру майже кожної із численних приполярних дюн, та дуже нечасто – на їх гребнях (Рис. 5.1).

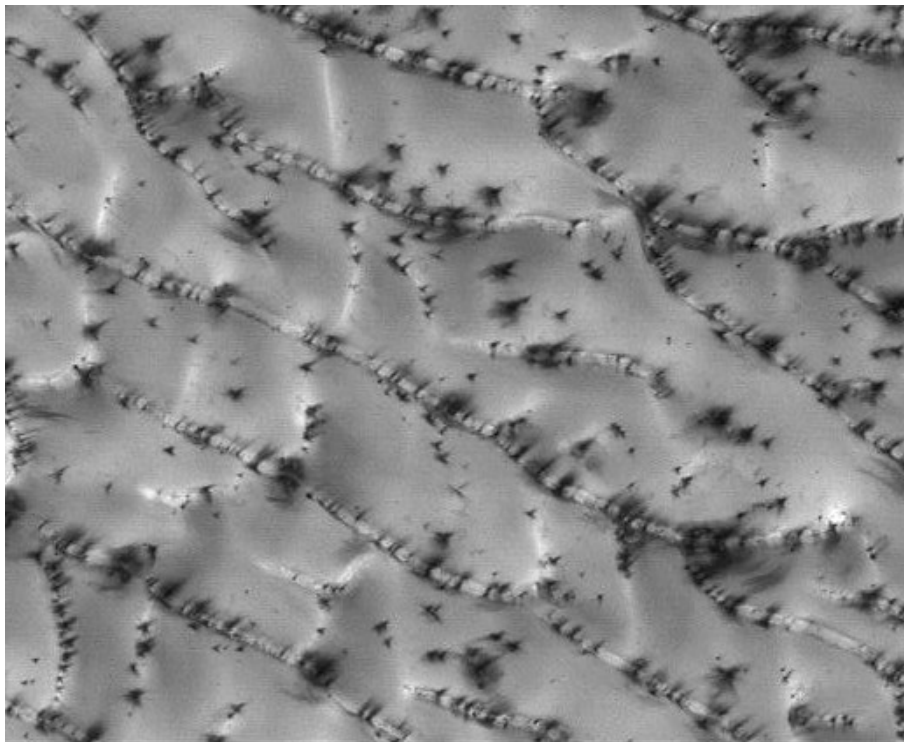


Рис. 5.1. Темні плями на поверхні марсіанських дюн (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Розташування плям незалежно від висоти оточуючої місцевості і їх форму (круглі на плоских поверхнях і видовжені на схилах) намагалися пояснити за допомогою відомих фізичних механізмів. Вважали навіть, що характерні плями, які з'являються кожної весни поблизу південної полярної області Марса, можуть виявитися видимими ознаками наявності певних форм життя на планеті. Так у 2003 р. група угорських дослідників детально обстежила околиці південної полярної шапки за даними з різних космічних апаратів. І для пояснення цього феномена вони запропонували біологічну гіпотезу, при якій ці плями можуть бути колоніями певних мікроорганізмів. Вважали, що упродовж зими вони знаходяться під поверхнею льодового покриву.

Після появи Сонця над горизонтом, промені світла проникають крізь лід, і спонукають до поновлення процесів фотосинтезу. А тепло, що при цьому виділяється, нагріває найближче оточення. Вода, яка в нормальному стані миттєво випарувалася б у розрідженій атмосфері планети, зберігається в порожнинах під крижаним покривом. У

міру того як крижаний покрив поступово стає тоншим, колонії мікроорганізмів стають видимими крізь нього сірими плямами. І як тільки лід повністю розтоплюється, вони миттєво зневоднюються і стають значно темнішими. Такий сценарій дозволяє пояснити наявність у цих утворень темного центру, оточеного сірим ореолом.

Адже на нашій Землі життя існує навіть у дуже суворих умовах. Зокрема, мікроорганізми були виявлені у водяних порожнинах під крижаним покривом солоних озер в долинах Антарктиди. Проте умови в марсіанських приполярних дюнах є куди суворішими. Температура в них може опускатися до 147 К, порівняно із мінімальним значенням близько 190 К в Антарктиці. До того ж, розріджена марсіанська атмосфера пропускає значно більше ультрафіолету, ніж навіть позбавлена значної частини захисного озонового шару атмосфера над Антарктидою. Але найсерйознішою проблемою для марсіанських мікроорганізмів є відсутня нестача води.

Зараз продовжують весті пошук можливих фізичних і геологічних пояснень даного феномена. Плями можуть утворюватися при поступовому виділенні газу, зокрема водяної пари, з марсіанської кори. Розглядається можливість формування подібних плям з пилу, який переноситься вітром.

За результатами спостережень після 2003 року, темні плями виглядають так, начебто вони є потоками газів, які видуються із середини порожнин через вузькі отвори на поверхні. Ретельні дослідження показали, що ці плями такі ж холодні, як і крижана кора з вуглекислого газу під ними. Це дозволило запропонувати гіпотезу, згідно котрій видимі плями можуть бути газовими струменями вуглекислого газу із домішками пилу та піску. Вони вириваються з-під кори через тріщини та отвори, які утворюються при нагріванні під шаром сухого льоду.

Оскільки з приходом весни навколо-полярні області починають прогріватися, то кора із замерзлого вуглекислого газу стає все тоншою; у ній починають з'являтися тріщини, утворюються окремі отвори і через них розпочинаються виверження CO₂ в газоподібній фазі із захопленнями домішками. Дана гіпотеза дозволяє пояснити колір плям, обумовлений піском і пилом, котрі входять до складу гейзерних викидів, та їх досить низьку температуру. Адже випаруваний вуглекислий газ залягає під замерзлим шаром сухого льоду протягом певного часу. Із приходом навколо марсіанського полюса зими, температура там опускається навіть до 143 К.

Це дуже холодно і для атмосфери Марса, яка переважно складається із двоокису вуглецю. За такої температури вуглекислий газ в атмосфері перетворюється в лід. І доки триває зима, то все більша частина змішаного з пилом CO₂ переходить у тверду фазу, і протягом зимового сезону поступово осаджується на поверхню планети. До кінця зими даний заморожений шар перетворюється у напівпрозорий лід, із товщиною дещо менше 1 метра. При весняному потеплінні цей лід перетворюється у напівпрозору кригу. Через неї проникають сонячні промені та нагрівають нижні шари замороженої суміші діоксиду вуглецю, води, пилу й піску. Забруднена підкладка під цим шаром льоду є дуже темною і тому швидко нагрівається. Проминувши рідку стадію, замерзлий лід зразу ж переходить в газоподібний стан (відбувається сублімація льоду). На певній глибині поступово створюються своєрідні газові «резервуари», які тиснуть знизу на крижаний шар. При цьому в деяких місцях лід не витримує створеного тиску, ламається і через утворені проломи газ виривається із швидкістю до 45 м/с. Захоплений газом пил і пісок піднімаються в атмосферу. Ці частинки мають різну масу: важкі піщинки не можуть піднятися високо і падають недалеко від отвору; так утворюються «плями»; легші – відносяться вітром далі від точки виходу, утворюючи тонкі узори, які називають «віяла» (Рис. 5.2); а ще легший пил відноситься на ще більші відстані.

За рахунок повітряних потоків одні частинки відлітають якнайдалі, а інші залишаються поруч з «жерлом» таких сезонних «міні вулканів». При цьому поверхня

льоду вкривається тонким шаром темного ґрунту, який сильніше поглинає сонячне світло і нагріває лід ще й зверху. Таких темних і холодних плям із розмірами близько 50 м чимало виявлено як у південному, так і в північному приполярних районах Марса.

Вони починають з'являтися наприкінці зими у кожній півкулі спочатку по периметру дюн, а пізніше (хоча й нечасто) – на їхніх гребнях; влітку – ці плями зникають.

При віддалені від полюсів сублімація вуглекислого газу проходить значно швидше й інтенсивніше. А поверхня планети ще довго залишається покритою льодом, доки майже весь шар двоокису вуглецю до кінця «теплого» сезону не перетвориться в газ. Після цього залишаються піщані сліди у вигляді своєрідних «павутинних» форм (Рис. 5.2).

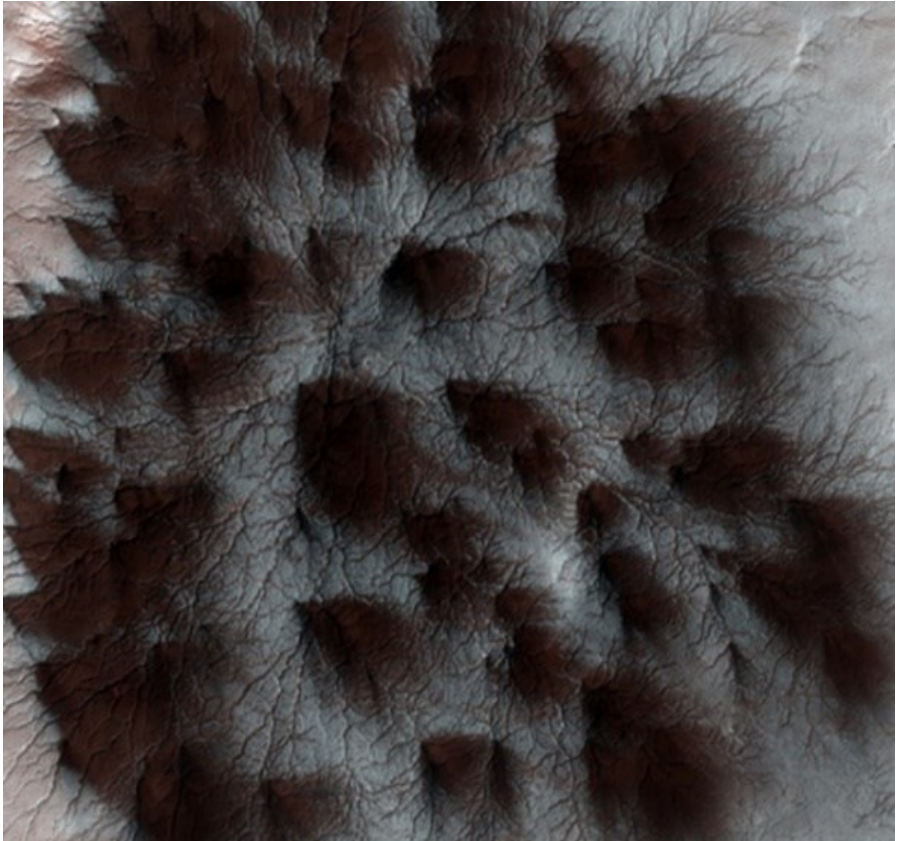


Рис. 5.2. Приполярні темні «плями» (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Таким чином, Марс під сезонним покривом льоду з діоксиду вуглецю, кожної весни формує кратери «міні вулканів» на солових відкладеннях (Рис. 5.3). Вплив потоків повітряних мас на навколишнє середовище можна спостерігати повсюдно. Робота вітру є і рельєфо-утворюючим фактором, який має особливо великий вплив на території піщаних пустель. Ті форми рельєфу, які утворилися в результаті роботи вітру, носять назву солових. Рельєф подібного виду утворюється під впливом наступних процесів:

- дефляції – видування пухкого ґрунту;
- корозії – шліфування й обточування твердих порід;

- переносу ґрунтів повітряними потоками;
- акумуляції матеріалів.



Рис. 5.3. Приклад еолових відкладень (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Швидкість вітру безпосередньо пов'язана з перенесенням частинок ґрунту, що знаходиться на поверхні планети. Так, при русі потоку повітряних мас протягом однієї секунди на відстань 4.5-6.7 м можуть переміщуватися піщинки діаметром до 0.25 мм.

При більшій швидкості (11.4-13 м/с) їх розміри можуть становити до 1.5 мм. Марсохід «К'юріосіті» дослідив вітрові відкладення у кратері Гейл (Рис. 5.4). Вони вказали на давню систему наявних там дюн.

Цей регіон був посушливим у період, коли ця система дюн лише почала утворюватися. Тоді як дослідження старіших відкладень чітко вказали на те, що раніше у цьому місці було озеро [2]. Вивчаючи осадові структури та внутрішнє розшарування порід у давно утворених вітром піщаних дюнах, можна дізнатися про фізичні процеси, при яких вони формувалися, реконструювати їхню попередню форму, їх переміщення, і визначити тривалість їх існування. Дослідження таких історичних відтворень за допомогою орбітальних апаратів та роверів дозволяють вказати на особливості минулого клімату та на його історичні зміни у даному регіоні Марса.

Ровер «К'юріосіті» працює у кратері Гейла з 2012 р. Тут, біля підніжжя гори Шарпа знаходяться відкладення осадової породи пісковика. Попередні дослідження дозволили виявити форми рельєфу, які раніше були дюнами. Зібрані камерами ровера «К'юріосіті» дані були використані для характеристики типу цих дюн, їхнього розміру, орієнтації та переміщення. Детальний аналіз осадових відкладень вказує, що система давніх дюн тут була ієрархічною: вони мали досить різні розміри та переміщувалися з різною швидкістю і в різних напрямках.

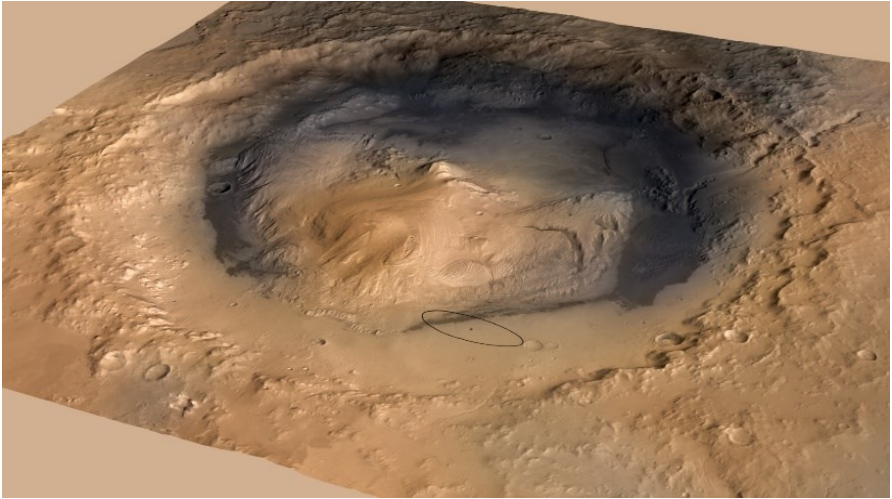


Рис. 5.4. Еліпс показує місце початку місії ровера “Curiosity” в кратері Гейла (PIA15686-Fig1-new_ellipse_wide-full2.jpg).

Великі дюни мали висоту від 20 до 40 м. Вони розташовувалися на відстанях від 300 до 600 м одна від одної. Менші дюни мали висоту 2-3 м, і могли мігрували схилами дещо більших дюн. Дюни великих розмірів переміщувалися переважно на північ; а дюни менших розмірів прямували до північного сходу. Вважають, що утворений ландшафт став продуктом змін регіонального клімату і тих процесів, які відбувалися на поверхні кратера Гейла у часи гесперійського геологічного періоду, який тривав від 3.7 до 3 млрд років тому. Середовище тоді було досить посушливим. Воно контрастує з більш ранніми відкладеннями, які формувалися в умовах дуже вологого клімату. Згідно із спостережними супутниковими даними, ці піщані дюни Марса мігрували із швидкістю до 1 м протягом одного земного року. Зараз обидві полярні шапки оточені піщаними дюнами, які утворені із шматків темної вулканічної породи базальтового типу.

6. Мікрорельєф поверхні Марса.

Вже перші панорами в місцях посадки модулів [100] «Вікінг-1 і -2» та «Пасфайндер» (Рис. 6.1, 6.2) показали, що поверхня Марса досить насичено вкрита окремими каменями.

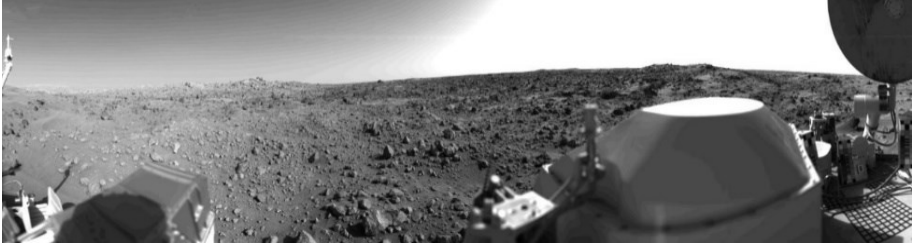


Рис. 6.1. Перша панорама з посадочного модуля «Вікінг-1» (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

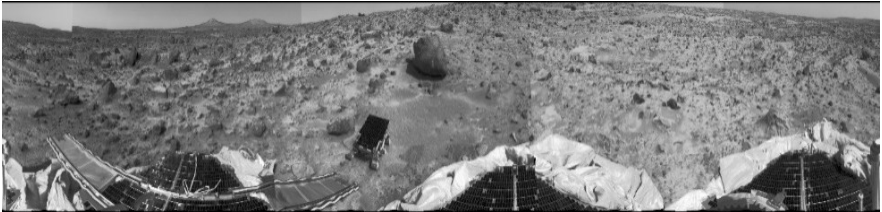


Рис 6.2. Панорама місця посадки модуля «Пасфайндер» (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

У місцях посадки зондів «Вікінг-1, -2» було проведено мінералогічний аналіз проб ґрунту з чотирьох місць. Це дозволило створити уявлення щодо геохімічного складу (у відсотках, масова частка) поверхневого шару [62, 64, 135] планети (Таблиця 1).

Допускається, що невказані тут такі хімічні сполуки, такі як H_2O , CO_2 , Na_2O та, можливо, NO_2 – можуть становити ті долі відсотків, яких бракує до 100% [89].

На посадочних модулях «Вікінг-1 і -2» були встановлені тривісні сейсмометри надвисокої чутливості. Це дозволяло реєструвати навіть механічні рухи на модулях, які були зумовлені роботою магнітофона, забірника ґрунту тощо; а також зареєструвати поздовжні хвилі, які відповідають землетрусам з магнітудою 2.5 бали на відстані 100 км, та 6.5-7 балів – на всій планеті. В місці посадки апарата «Вікінг-2» за перші 60 днів не було зареєстровано жодних ознак марсотрусів [1].

Таблиця 1. Приблизний геохімічний склад (у відсотках, масова частка) поверхневого шару планети.

SiO_2	42,8...44,7 \pm 5,3	K_2O	< 0,3
Al_2O_3	5,5...5,7 \pm 1,7	TiO_2	0,9...1,1 \pm 0,3
Fe_2O_3	18,0...20,3 \pm 2,9	SO_3	6,5...9,5 \pm 1,2
MgO	8,3...8,6 \pm 4,1	Cl	0,6...0,9 \pm 0,3
CaO	5,0...5,6 \pm 1,1		

Оскільки на Марсі є атмосфера [98, 99] та зумовлена нею досить активна вітрова діяльність, то це призводить до появи як ерозійних [101, 107, 120] деталей, так і солових

відкладень та дюн (Рис. 5.3). В [69] з аналізу отриманих протягом чотирьох місяців зображень у південному приполярному районі – за характером ерозії було виділено три основні геологічні структури: найдревніша кратерована місцевість (Рис. 6.3, ліворуч), покрита котловано-подібними впадинами плато (вік яких оцінюється в 10^9 років) та наймолодші місця (Рис. 6.3, праворуч) з шаруватою структурою (вік яких імовірно за все обчислюється декількома мільйонами років).

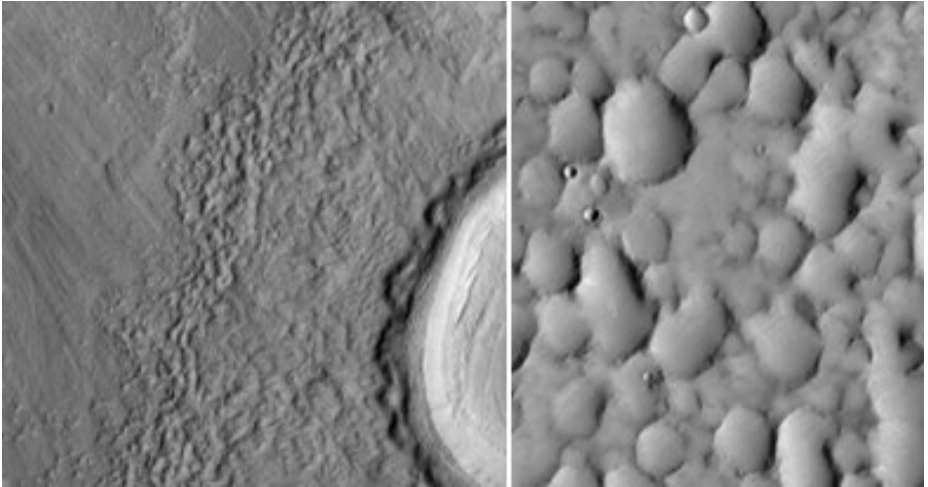


Рис. 6.3. Ліворуч – викиди з кратеру в районі Utopia. Праворуч – приклад розташування великої кількості дрібних кратерів на фоні більших розмірів поблизу Maadim Vallis (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

При цьому кратерні ерозії в полярному районі – не є інтенсивніші ніж будь-де на поверхні планети за всю історію [79, 112]. За даними радіолокаційних експериментів були визначені величини ефективної діелектричної проникності $\varepsilon=(1\div 5)$, густини ґрунту ($0.5\div 3.5$ г/см³) на різних ареографічних довготах та середньоквадратичних кутів нахилу деталей поверхні $\sigma_a=(0\div 12^\circ)$ [21]. Нагадаємо, що значення перерахованих параметрів характеризують нерівності, розміри яких знаходяться в межах $(1\div 1000)\cdot\lambda$ (λ – довжина хвилі радіопромменя).

Між оціненими за даними радіолокації спостережень величинами коефіцієнта діелектричної сталості та тепловою інерцією – має місце чітка кореляція [47, 91]. Починаючи зі спостережень за допомогою космічних апаратів «Марінер-6, -7», які пролетіли мимо Марса, здійснювались експерименти з бістатичної радіолокації.

Це дозволило досліджувати характеристики порівняно дрібних за розмірами деталей. Так, космічний апарат «Марінер-6» такий експеримент на довжині хвилі 13 см вів приблизно протягом 5 хвилин. Він виконав радіолокацію траси густо насиченої кратерами темного району Meridiani Sinus і рівнинного та яскравого району Thymiamata.

Кут падіння радіопромменя становив майже 87° . Оскільки радіопромінь був правосторонньо поляризованим по колу, то на кутах падіння менших від кута Брюстера [7], відбитий промінь умовно ділився на два: один залишався правосторонньо поляризованим, а другий – мав лівосторонню поляризацію.

Оцінки середньостатистичного кута нахилу показали, що по трасі він зменшувався від 3° до 1° [30]. Значно більший обсяг спостережних даних було отримано

з орбітальних апаратів «Вікінг-1, -2». Так, у [81] приводяться дані про зміну середньостатистичного кута нахилу в області Hellas [85, 86, 111, 115, 116] у межах широт 40-47°S та довгот 299.8÷295.8°. Виявилось, що величина середнього значення кута нахилу поступово зменшуються у напрямку із півдня до півночі від 4.5° до майже 2.5°. Крім того, було визначено коефіцієнт діелектричної сталої $\epsilon=3.1$. У місцях посадки космічних апаратів «Вікінг-1, -2» були визначені значення діелектричної сталої ϵ та електропровідності ґрунту $\sigma_{\text{ел}}$.

Вони виявились, відповідно, рівними $3.3\pm 0.7, 10^{-5}\text{-}10^{-3}$ у місці посадки «Вікінг-1» і $2.8\text{-}12.5, 10^{-5}\text{-}10^{-3}$ – для «Вікінг-2» [88]. Також, було отримано, що при переході від екватора до північного полюса значення кута нахилу зменшується. Особливо це помітно для широт більших 60°, де кут нахилу знаходиться в межах $2.5\div 3.5^\circ$. Були знайдені й ділянки, для яких кут нахилу менший від 1° [81]. Крім локації в радіодіапазоні, з орбітальних модулів деяких космічних апаратів проводилась ще й лазерна дальнометрія. Так, наприклад, з борту апарата «Марс Глобал Сурвейер» була проведена детальна дальнометрія з роздільною здатністю по висоті 0.3 м та по трасі – від 300 до 400 м. А в роботі [82] приведені результати локації на 17 трасах у північній півкулі, які були здійснені в період між 14 жовтня та 6 листопада 1997 р.

В радіофізичних дослідженнях дещо відокремлено стоять радіолокаційні спостереження, які незалежно були започатковані в протистояння 1963 р. в СРСР [52] на довжині хвилі 43 см, та в США на довжині хвилі 12.5 см [34]. Вони були продовжені в протистояння 1965, 1967, 1969, 1971 та 1975 рр. Особливо активними були дослідження в протистояння 1971-1975 рр., коли вибирались місця посадки для модулів КА «Вікінг-1, -2» [21]. Так, радіолокація на довжині хвилі 3.8 см, яка проводилася протягом 6-ти місяців у протистояння 1971 р. з просторовою роздільною здатністю до 100 км, дозволила дослідити зміни перепаду висот деталей на різній довготі і широті [75].

Космічний апарат «Марс Глобал Сурвейер» з допомогою лазерного висотоміра з середньою точністю вимірювань у 13 м, а на рівних поверхнях – навіть до 2 м – дозволив виготовити детальну карту Марса (Рис. 3.1). Гори на ній жовтого й коричневого, а западини – зеленого й синього кольорів.

Своєрідний район скупчення плоско-вершинних гір розташований у перехідній зоні від піднесеної області до рівнин у північній півкулі. Тут знаходяться плоскі так звані Столові гори Цидонія, Нілосірт, Протоніл, Дейтероніл. Вони розташовані на ділянці великого круга під кутом 35° до екватора.

Цей круг відокремлює рівнинну (низинну) півкулю планети від материкової (піднесеної) півкулі. Район Столових гір Цидонія (Рис. 6.4) характеризується скупченням хаотичних форм, пов'язаних з глобальним уступом шириною більше 100 км. Відмітимо, що саме в ньому були відмічені цікаві форми рельєфу, що отримали назви «піраміди» і «сфінкс».

На Рис. 6.4 проступають 19 пірамід і інших «будівель», з'являються лінії-«дороги» і посередині – дивний круглий майданчик діаметром в кілометр. «Дороги» проходять не випадковим чином: дві з них нібито підходять до пірамід, відразу три сходяться до круга в центрі. Причому, розміри пірамід вражають увагу: адже розміри найбільшої центральної піраміди майже у десять разів перевершують відому піраміду Хеопса у Єгипті.

Серед багатьох скельних порід у Цидонійському регіоні знаходиться моноліт шириною близько кілометра; зовні він нагадує обличчя із добре помітними рисами людини та поглядом, зверненим у космос. Побачити це зображення із Землі було неможливо навіть за допомогою телескопів. Тільки перебуваючи на марсіанській орбіті, стало можливим розгледіти даний феномен.

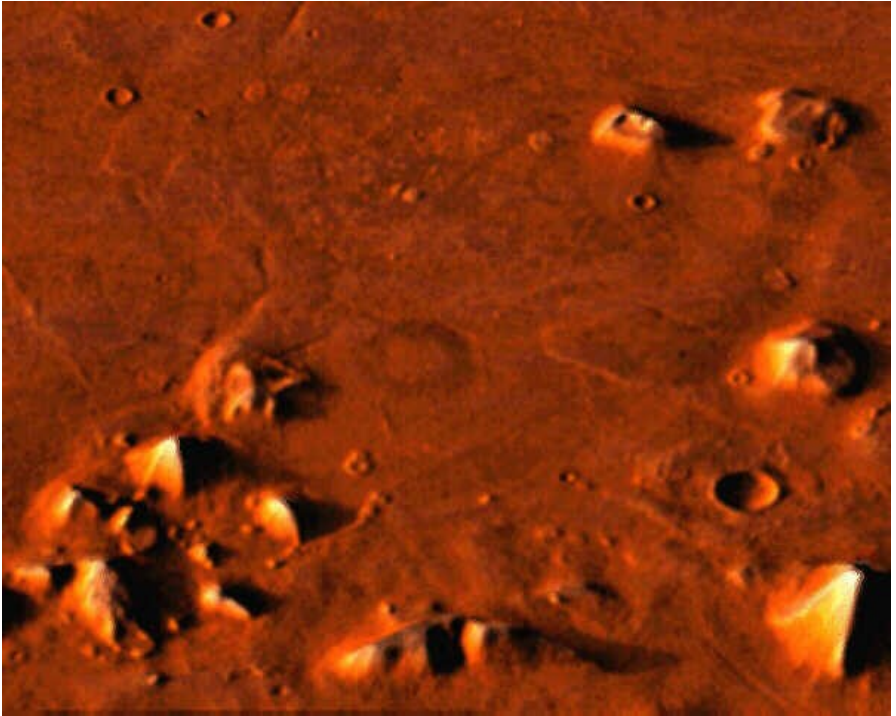


Рис. 6.4. Скельні породи у районі Цидонія (піраміди, сфінкс, дороги)
(<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

7. Координати і назви на Марсі.

На Землі при визначенні географічних координат у якості початку відліку прийнято вважати довготу, на якій знаходиться Королівська обсерваторія в Грінвічі (Великобританія). Аналог «меридіана Грінвіча» є й на Марсі. Коли з борту американського космічного апарата «Mariner-9» були отримані якісні знімки марсіанської поверхні й вдалося скласти докладну карту [91, 99, 100] Марса, кратер з діаметром ~0.5 км одержав спочатку назву «Ейрі-0» [135].

Пізніше йому присвоїли ім'я німецького астронома Р. Медлера. Саме він запропонував вести відлік довгот від чіткої темної деталі на дні кратера. Її знайшли на дні кратера Ейрі з діаметром 56 км, і назвали на честь англійського астронома Джорджа Ейрі (1801–1891), директора Грінвічської обсерваторії. Космічний апарат «Mars Global Surveyor» отримав детальні фото цього об'єкта 13.01.2001. Це дозволило вивчити його геологічну структуру [106, 144, 153] та уточнити координати всіх інших об'єктів на поверхні червоної планети.

У 1958 р. Міжнародним астрономічним союзом було затверджено номенклатуру найменувань деталей на карті [154]. В її основу було покладено запропоновану ще Дж. Скіапареллі систему найменувань. Тому на сучасних картах Марса поряд з новими найменуваннями, присвоєними певним формам рельєфу, які виявлені завдяки космічним знімкам, використовуються й давні географічні та міфологічні назви, запропоновані Скіапареллі. Так, велика піднесена область, поперечником близько 6000 км і висотою до 9 км одержала назву Фарсіда; саме так на древніх картах називався Іран. А величезне кільцеве пониження на півдні, діаметром близько 4000 км, назване Хеллас (Еллада – Греція). Сильно кратеровані ділянки поверхні одержали назви земель (наприклад, Земля Прометея, Ноя та інші).

Долинам даються назви планети Марс на різних мовах народів світу. Наприклад, Долина Храт – означає Марс на вірменській мові, Долина Маадім – на івриті. Виключення з цього правила зробили лише для гігантських Долин Марінера, названих на честь успішного фотографування всієї поверхні Марса з КА «Марінер-9».

Невеликі кратери [119] носять назви деяких населених пунктів Землі. Менші по протяжності долини називають іменами річок на Землі. Арсія – назва класичного альбедного утворення; Япігія – стародавня назва італійської провінції Апулії; Аерія – грецька назва «Далекої країни за туманами»; Ацидалійське море – по аналогії з Ацидалійським джерелом, де Афродіта купалася разом з граціями; Затока Перлинова – носить ім'я півострова Індостан, де добувають перли. Крупні кратери [145] зараз продовжують називати на честь учених (посмертно), що внесли помітний внесок у вивчення Марса.

Цим була продовжена традиція астрономів XIX-го століття. Наприклад, чотири найбільші кратери діаметрами більше 400 км названо на честь Х. Гюйгенса, Дж. Кассіні, Дж. Скіапареллі і Е. Антоніаді – піонерів телескопічних спостережень Марса.

У районі, прилеглому до Плато Великий Сірт, назви кратерів пов'язані з астрономами, що здійснювали зарисовки деталей на поверхні Марса, по яких складалися карти. Західніше від Плато Сірт у районі Землі Аравія, кратери носять імена французьких учених. Серед них є як астрономи, відомі своїми візуальними, фотометричними й поляриметричними [58, 61] спостереженнями Марса, так і фізики – першовідкривачі радіоактивності – А. Беккерель, П. Кюрі і М. Склодовська-Кюрі. Тут же знаходиться й кратер, названий на честь англійського фізика Е. Резерфорда.

Західніше від цього Плато – знаходяться й кратери названі на честь радянських астрономів, що займалися фотометричними дослідженнями Марса: Н. Барабашов, Є. Перепьолкін, В. Фесенков і В. Шаронов. Кратери в екваторіальній області поблизу

нульового меридіана названі іменами астрономів, що виконували вимірювання координат деталей поверхні [79, 101, 112, 120], які визначали період обертання планети і її розміри.

Імена астрономів, що зробили зарисовки полярних [24, 44] шапок Марса, можна бачити на південь від Землі Ноя, в районі, куди сезонно [95, 96, 113] доходить взимку південна полярна шапка.

На захід від Рівнини Аргір кратери названі на честь американських астрономів, а на схід від цієї рівнини – у пам'ять німецьких учених. Назви на честь мореплавців – першовідкривачів нових земель – зосереджені на захід від меридіана 180°; тут же можна бачити й імена астрономів древності і середньовіччя.

З іменами учених, що висловлювали припущення про можливість життя [85, 111, 116] на Марсі, зв'язані назви кратерів на схід від Рівнини Еллада [115].

У північній полярній області лежать кратери, названі на честь М. Ломоносова і головного конструктора радянських космічних ракет С. Корольова. Прийнято, що кратерам діаметром 10–100 км. дають назви, що складаються з двох-трьох складів, а кратерам меншого розміру – назви, що складаються з одного складу.

Вже перші зображення, які були передані з КА “Марінер-4”, показали, що поверхня Марса різноманіттям дрібних деталей нагадує Місяць (Рис. 7.1). Це було суттєво доповнено та уточнено пізнішими місіями, що демонструють приведені нижче фото, які отримані шляхом синтезу окремих зображень.



Рис. 7.1. Ліворуч – насиченість марсіанської поверхні відносно великими й малими кратерами й долинами. Праворуч – зображення крутих схилів кратера в районі Nilosyrtis (01.04.2009) (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Що стосується так званих каналів Скіапарелі, то порівняння перших карт з отриманими за допомогою КА зображеннями з роздільною здатністю від 0,1 до 1 км, вказало на відповідність деяких каналів з рифтовими долинами, системами хребтів, ланцюжками кратерів та лінійним альбедними деталям (Agathodaemon, Valles Marineris (Рис. 3.2), Cezanius). Так, канал Slyph насправді корелює з горами Phlegra Montes, а деякі канали (наприклад, Cerebrus і Thoth Nepenthes) ототоженні з так званими альбедними деталями, які не пов'язані ні з якими топографічними особливостями.

Однак переважна більшість каналів не відповідають ні альбедним деталям, ні топографічним особливостям, та й навіть не відповідають реальній поверхні. За даними зображень, які були передані КА “Марінер-4, -6, -7” у 1965 і 1969 рр., були побудовані доволі детальні карти марсіанської поверхні. А спеціальна комісія МАС розробила й нову

номенклатуру назв, яку було затверджено у 1973 р. [18]. При цьому дотримувались наступної схеми. Уся поверхня Марса була розділена на 30 обмежених паралелями та меридіанами районів (по 8 приекваторіальних, по 6 полярних і по 1 полярному у кожній півкулі); кожному з них присвоєно назву класичної деталі, яка знаходиться у даному районі, та скорочений шифр, що складається з трьох літер із яких розпочинаються назви усіх кратерів даного району).

Для кожного такого району приводиться окрема карта з масштабом 1:5000000 [3]. Усі кратери кожного району з діаметром понад 20 км (всього таких на поверхні Марса є близько 6000) позначено двома літерами — від *Aa* до *Zz*. Першу літеру поставлено за порядком збільшення довготи зі сходу на захід, а другу — за порядком збільшення широти з півдня на північ.

Для районів з максимально високою щільністю кратерів використано позначення із трьох літер. Великі кратери, діаметр яких, як правило, понад 100 км, названо іменами покійних науковців, внесок яких у вивчення Марса чи Сонячної системи загалом був значущим. Таких кратерів є близько 180. Всі інші топографічні деталі об'єднано у 13 класів. Для 12 із них використовували, як правило, назви розташованих поряд класичних альбедних деталей.

Відразу після назви вказували клас деталі (наприклад, *Olympus Mons*). Винятком є хвилясті канави, назви яких є назвами планети Марс на різних неіндоевропейських мовах. Нижче наведено визначення окремих класів об'єктів. *Catena* — ланцюжок кратерів; *Chasma* — каньйон; *Dorsum (Dorsa)* — хребет (хребти); *Fossa (Fossae)* — вузькі депресії великої протяжності, які, зазвичай, трапляються групами; *Labyrinthus* — група долин, які перетинаються; *Mensa (Mensae)* — плоскогір'я з крутими схилами; *Mons (Montes)* — гора; *Pateta* — кратер неправильної форми або група таких кратерів; *Planitia* — понижена рівнина. Повний список назв на поверхні Марса, затверджений Міжнародним астрономічним союзом, можна знайти в [154].

Загалом з 13.11.1971 до 27.10.1972 КА «Марінер-9» передав більше 7300 зображень. З них приблизно 1500 зображень були отримані з високою просторовою роздільною здатністю. Це дозволило побудувати карту всієї поверхні планети з просторовою роздільною здатністю в межах від 1 до 3 км. Для 1-2% поверхні — були також отримані зображення з роздільною здатністю у 100-300 м. В роботі [135] детально описано топографічні, геологічні, альбедні та деякі статистичні характеристики окремих деталей марсіанської поверхні.

Незважаючи на те, що час підльоту КА «Марінер-9» та «Марс-2, 3» припав на стадію ще досить потужної пилової бурі в глобальних масштабах, але вже на перших зображеннях переданих з КА «Марінер-9» явно проглядались 4 альбедні деталі, які пізніше були ототоженні з кратерами найвищих гір:

Olympus (його висота h над рівнем поверхні з тиском 6.1 мбар тоді була визначена як 28 км, діаметр неправильного конуса в основі складав $D = 600-900$ км),

Arsya ($h = 25$ км, $D = 500$ км),

Pavonis ($h = 24$ км, $D = 400$ км) і

Askraeus ($h = 24$ км).

Висоти відносно довкілля — були дещо меншими і становили, відповідно, 25, 18, 17, 17 км. Діаметри основних кальдер — визначались у 65, 70, 40 та 60 км, відповідно.

З очищенням атмосфери [49, 62, 98], число видимих кратерів збільшувалось на порядки. Виявилось, що вся поверхня вкрита кратерними утвореннями, які присутні не лише в гірських, але й у рівнинних районах.

Загалом на топографічній карті тоді було виділено дві великі за розмірами підвищені ділянки, в центрах яких знаходяться області *Tharsis* та *Isyrugia*, які рознесені по

довготі на 120° . Вони мають продовговату форму та витягнуті приблизно з південного заходу на північний схід.

Приблизно вздовж широти -5° на декілька тисяч кілометрів через підвищення Tharsis простягається система гігантських рифтових долин Valles Marineris, які подібні земним каньйонам тектонічного походження. Між широтами -30° та -65° розташовані дві низинні рівнини – Hellas Planitia та Argyre Planitia, але вже трохи менших розмірів.

8. Атмосфера Марса.

Марс рухається по досить витягнутій орбіті з великою піввіссю 1,524 а. о. та ексцентриситетом 0.0934. Він є наступною від Сонця після Землі планетою [135]. Через велике значення ексцентриситету, мінімальна відстань між цими двома планетами у протистояння (тобто кожні 770-789 днів) міняється від 55 до 101 млн км.

По цій причині умови спостереження Марса з поверхні Землі залежать від того, наскільки близький він до перигелію, чи афелію [106]. Тривалість сидеричного періоду (року) на Марсі становить 686.98 земної доби.

Форма Марса з високою точністю апроксимується тривісним еліпсоїдом з величинами його взаємно перпендикулярних осей $A=3398.67$, $B=3394.71$ та $C=3378.44$. При наземних спостереженнях на поверхні Марса добре видно світлі (материків) і темні (морів) деталі. За цими спостереженнями вдалося визначити значення періоду прямого обертання Марса довкола осі ($24^h37^m22.6679^s$). Крім морів та материків у полярних районах планети спостерігаються ще й дуже світлі області, площа яких змінюється в часі [99]. Їх називають полярними шапками. Також, за наземними спостереженнями на видимому диску Марса реєструвались і короткоживучі деталі над материками. Оскільки їх фотометричний контраст збільшується зі зменшенням λ , то їм приписали конденсатну природу. Інші – проявлялися в основному над морями в довгохвильовому спектральному діапазоні.

Їх ототожилили з пиловими хмарами, час життя котрих також обмежувався днями. Проте під час протистоянь вони починали швидко збільшуватись за розміром. І через досить короткий час вони закривали практично всю поверхню непрозорим шаром. Періоди хорошої видимості деталей на поверхні, назвали періодами високої прозорості атмосфери, а другі – називають періодами глобальних пилових бур.

Тому атмосфера [98] планети здійснює досить помітний вплив на формування її поверхні Марса. Розріджена марсіанська атмосфера містить 95.3% вуглекислого газу, 2.7% молекулярного азоту й 1.6% аргону, С (0.06%), H_2O (до 0.1% й істотно змінюється залежно від сезону [96, 101]). Кисень – присутній тільки у вигляді незначних слідів. Атмосферний тиск біля поверхні становить 0.7% тиску біля поверхні Землі; і лише у найглибших западинах планети – тиск досягає значення в 12 мбар. Сильні вітри в атмосфері викликають дуже потужні пилові бурі [4], котрі іноді можуть охоплювати всю планету; при цьому, пил може підніматися на висот близько 20 км.

На Марсі спостерігаються різноманітні форми хмар і туманів. Вранці туман згущається у долинах. По мірі того, як вітрами охолоджені маси повітря поступово піднімаються на підвищені плоскі плато, хмари появляються і над досить високими горами (Рис. 8.1). Взимку північна полярна шапка також огортається завісою крижаного туману й пилу. Подібне явище у трохи менших масштабах спостерігається й навколо південного полюса.

Полярні області виявилися покритими тонким шаром льоду. Вважається, що цей лід є сумішшю водяного льоду й твердого CO_2 . Зображення з високим ступенем просторової роздільної здатності показують спіральні утворення від нанесеної вітром речовини. Північна полярна область виявляється оточеною рядами дюн. Полярні крижані шапки збільшуються та зменшуються у відповідності зі зміною пір року.

В атмосфері на висоті 36-40 км є навіть слабкий озоновий шар товщиною близько 7 км. Він у 250 разів менш потужний від земного. На висоті близько 300 км основною складовою атмосфери є атомарний кисень. Його наявність пояснюється фотодисоціацією вуглекислого газу. Адже густина другого її продукту, вуглецю С, падає швидше з висотою, ніж густина кисню. Починаючи від висот у 400 км основним компонентом у марсіанській атмосфері стає одноатомний водень із концентраціями порядку 10^4 атомів в

1 см³. Очікується, що тут утримується приблизно така ж кількість гелію. А на висотах у кілька тисяч кілометрів атмосфера складається практично з чистого водню.

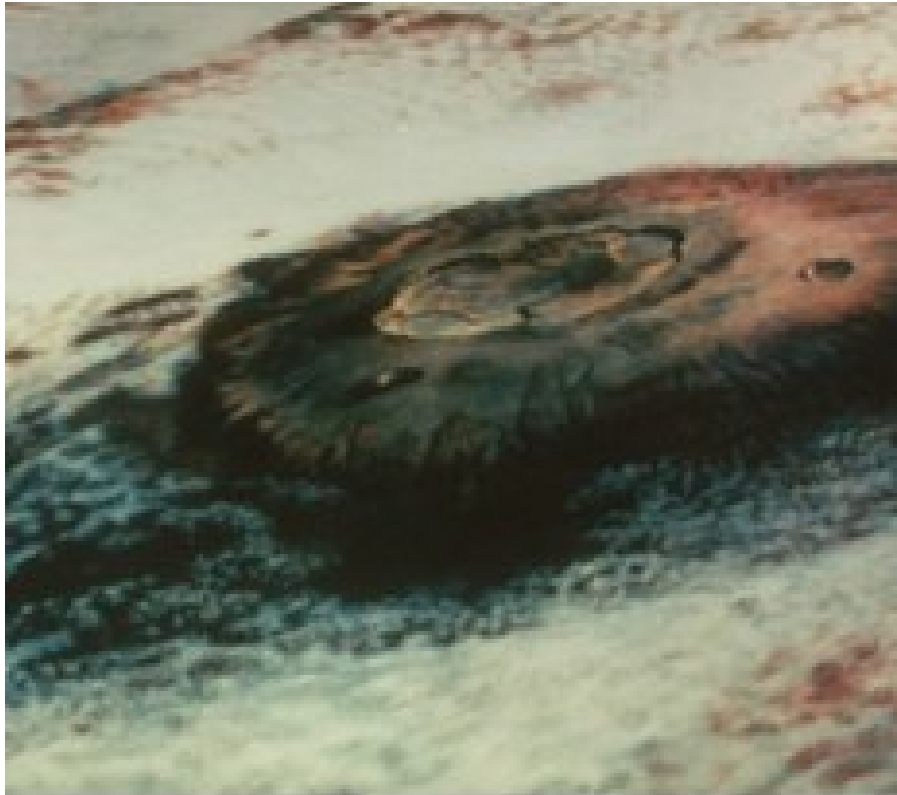


Рис. 8.1. Туман і хмири навколо вулкану Олімп (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Така чисто воднева зовнішня атмосфера Марса тягнеться аж до висот у 20000 км, утворюючи своєрідну «корону» планети. Вона досліджувалася різними автоматичними станціями за допомогою спеціальних приймачів, чутливих до випромінювання в резонансній лінії водню Лайман- α . Це випромінювання виникає при розсіюванні сонячних ультрафіолетових квантів атомами водню, які перебувають у верхній атмосфері Марса.

Тиск у багатьох місцях біля поверхні Марса близький до так званої потрійної точки води: 6.1 мбар [8]. За таких умов відкриті водойми не можуть існувати на сучасному Марсі. Однак вода на планеті є. Адже там знайдено сліди водяної пари в атмосфері, адсорбовану реголітом воду, кристалізаційну воду в породах, водяний лід у полярних шапках, у вічній мерзлоті навіть поруч з екватором, у солі різного складу; знайдено й витoki рідкої води [85, 111, 115-117] із ґрунтових пор на схилах деяких кратерів у тепліших областях у теплий час доби і т. п.

Незважаючи на те, що вода на Марсі переважно прихована [112, 120], її роль у сучасному стані планети досить значна [2, 5]: вона за певних умов навіть може служити регулятором, що підтримує вміст двоокису вуглецю в атмосфері на постійному рівні. Із

проблемою запасів води й історії клімату тісно зв'язана будова зовнішнього шару планети товщиною 8-10 км. Це завдання найкраще буде вирішуватися за допомогою геофізичних вимірювань «in situ» (сейсмозвідка, вимірювання теплового потоку, буріння) і довгохвильової радіолокації із орбітального супутника.

Зараз прогнозується, що запас води на Марсі може становити 100-500 м при умові, що рівномірний шар води укріє всю планету. У даний час значна по масі частка марсіанської атмосфери проходить через процеси конденсації (восени) і випаровування (навесні) двоокису вуглецю у сезонних полярних шапках. Це супроводжується його меридіональним переносом.

Доволі значна кількість двоокису вуглецю зараз не бере участі у сезонних процесах, тому що не встигає, очевидно, випаруватися в одній з полярних шапок (північній), а інша його частина – є адсорбованою реголітом. Як і на Землі, на Марсі, на формування клімату значний вплив здійснює атмосферний аерозоль. А в момент проходження Марса через перигелій, цей вплив суттєво підсилюється. Часто у цей період виникають глобальні пилові бурі, і перенос пилу вітром відіграє значну роль на планеті. Загальний характер будови атмосфери Марса показано на Рис. 8.2.

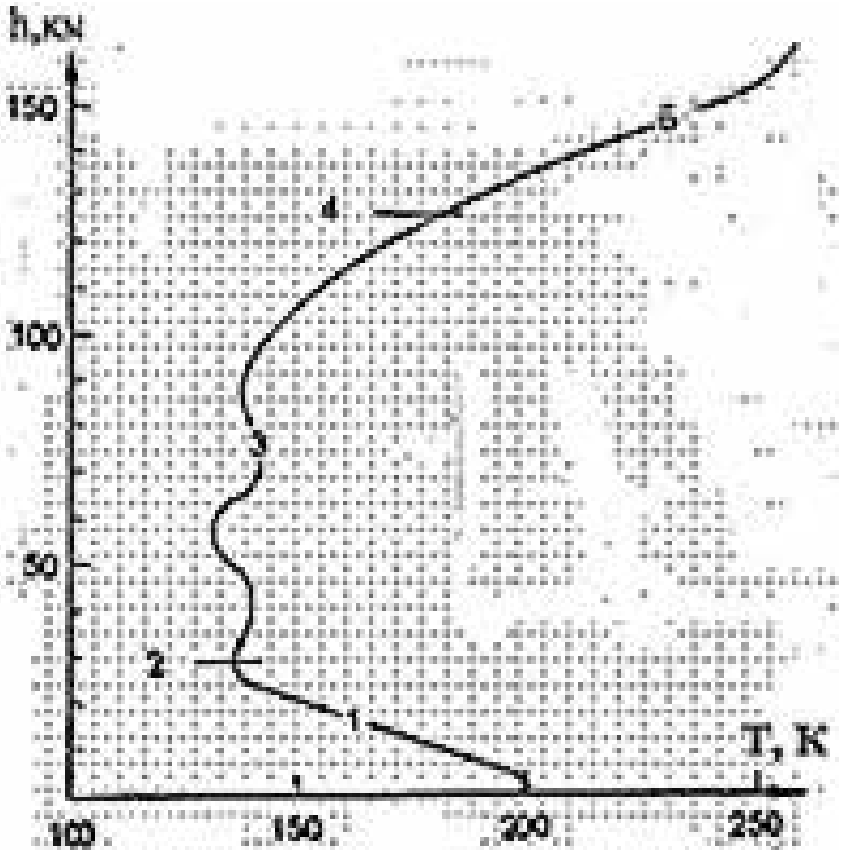


Рис. 8.2. Ліворуч – туман і хмари навколо вулкану Олімп (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Однак, наявна кількісна інформація все ще є недостатньою для створення повноцінної моделі загальної циркуляції. Відсутність на Марсі океанів робить його дещо простішим та дуже корисним об'єктом при розв'язанні подібних завдань. Для атмосфери на Марсі вивчаються наступні характеристики: її циркуляція, перенос уздовж меридіану при сезонній зміні напрямку, внутрішні гравітаційні хвилі, планетарні хвилі по півкулях, теплові припливи, вітри на схилах тощо. А дослідження динаміки атмосфери Марса повинні:

1) описати просторово-часову структуру повної циркуляції дуже тонкої атмосфери (Рис. 8.3);

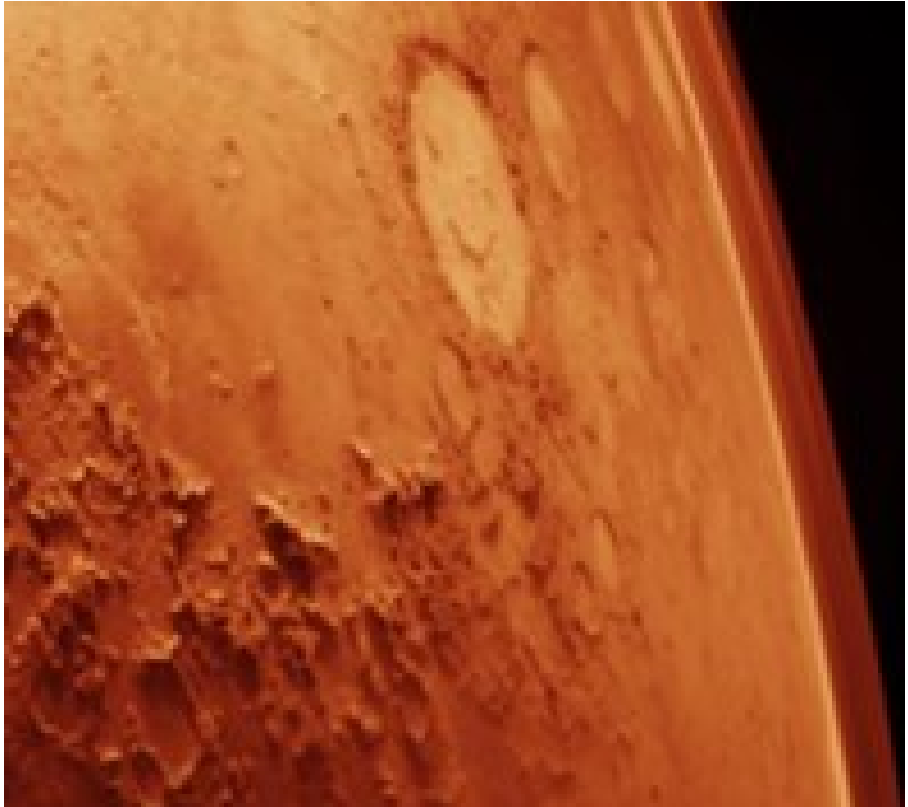


Рис. 8.3. Тонку марсіанську атмосферу видно над областю Argyre з орбітального апарата «Вікінг» (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

2) пояснити кількісно зв'язок цієї структури із зовнішніми факторами, такими як розподіл нагрівання й охолодження в глобальному масштабі, швидкість обертання, властивості поверхні (рельєф, альbedo, теплова інерція);

3) знайти зв'язок усього цього з переносом пилу й легких атмосферних складових і з еволюцією клімату.

Серед факторів, котрі впливають на історичну еволюцію атмосфери суттєву роль відіграють зміни у верхній атмосфері, і її взаємодія із сонячним вітром. Подібна взаємодія

значною мірою залежить від значення власного магнітного поля Марса. Сонячний вітер індукує магнітні поля в іоносфері, і тому необхідно знати їх структуру й поведження з часом для того, щоб дослідити власне магнітне поле Марса. Одночасно, необхідно визначити різні характеристики іоносфери, концентрацію й потоки частинок, температуру на різних висотах, властивості нейтральної верхньої атмосфери, її хімічний склад і висотну залежність температури.

Очевидно, що марсіанська атмосфера еволюціонувала. Вважають, що червоний колір Марса викликаний оксидами заліза, що виникли в результаті його зіткнення з астероїдом, який утворив область Хеллас. Математичні викладки дозволили оцінити розмір цього астероїда із кількістю атомарного заліза у $4.27 \cdot 10^{17}$ кг і масу молекулярного кисню на планеті, рівну $1.63 \cdot 10^{17}$ кг.

При умові, що форма астероїда була кульовою і складався він із заліза, то значення його діаметра мало бути близьким до 50 км. Дуже важливу роль в еволюції атмосфери відіграла також атмосферна дисипація. Вважають, що водень втік через процеси теплової дисипації, тоді як азот, вуглець та кисень могли втікати від дії різних механізмів при нетепловій дисипації. До таких методів належать, наприклад, вимітання нейтральних атомів і молекул захопленими іонами та й саме захоплення іонів сонячним вітром. Для дослідження еволюції планетної атмосфери потрібно вивчати такі процеси при прямих вимірюваннях у самій верхній атмосфері. Атоми водню у верхній атмосфері Марса повинні дисипувати у міжпланетний простір. Але, через їх присутність в теперішній атмосфері планети, повинні існувати безперервно джерела їх поповнення й зараз. Із загальних уявлень, основним таким джерелом може бути тільки дисоціація водяної пари у приповерхневих шарах марсіанської атмосфери. Тобто навіть тієї скромної кількості пари H_2O , що є там зараз, цілком достатньо для цієї мети.

Космічний апарат «Вояджер» уперше виявив в атмосфері планети хмари з рідкого аерозолу. Середній вміст H_2O в атмосфері Марса до 200 разів менший, ніж в атмосфері найсухіших регіонів Землі і складає 10-30 мкм осадженого стовпа води. Сезонні та добові зміни водяної пари становлять від 1 до 100 мкм. Так, взимку атмосфера є практично «сухою». Водяна пара з'являється в ній навесні і до середини літа її кількість досягає максимального значення, слідуючи за змінами температури поверхні. Протягом періоду літо-осінь водяна пара поступово перерозподіляється. Причому її максимальний вміст переміщується із північної полярної області в бік екваторіальних широт.

При цьому, загальний глобальний вміст пари в атмосфері, за даними апарата «Вікінг-1», залишається приблизно постійним і еквівалентним 1.3 км^3 льоду. Максимальний вміст H_2O (100 мкм осадженої води) був зафіксований влітку над темним районом навколо північної полярної шапки. Саме в цю пору року атмосфера над льодом полярної шапки зазвичай близька до насичення. Утворення явно конденсаційної природи, які періодично стають видимими в марсіанській атмосфері, представлені, в основному, білими хмарами та туманами. Якщо перші були виявлені ще при телескопічних спостереженнях, то другі – відкриті завдяки даним з космічних апаратів. Високо розташовані аерозольні утворення (понад 20 км) в атмосфері утворюються в результаті конденсації CO_2 . Цей же процес відповідальний за формування й низьких туманів у полярних областях. Причому, тумани та хмари є дуже поширеними якраз біля полярних шапок в зимові сезони, коли температура там в атмосфері опускається нижче від точки замерзання CO_2 (147 K).

Полярні хмари розташовані зазвичай досить низько над поверхнею, на висоті менше 10 км; вони є тонкими утвореннями з льоду H_2O в літній період і CO_2 взимку. Інфрачервоні спектри білих хмар, отримані за допомогою космічних апаратів, свідчать про те, що ці хмарні утворення переважно складаються з кристалів водного льоду. Як правило, подібні водяні хмари формуються на висотах до 20 км над марсіанською

поверхню. Відмічено, що багато які з цих хмар утворюються при піднятті повітряних мас по навітряних схилах крупних форм рельєфу. Однак навіть якщо вся атмосферна буде вологою, і якби вся волога випала на поверхню, то покрила б її шаром менше 0.01 мм. Над низинами та на дні багатьох кратерів в холодніший час доби дуже часто також формуються тумани (Рис. 8.4, ліворуч). Цей туман, що складається з частинок водяного льоду, концентрується в основному у межах долин. Але іноді туман виходить з них і тягнеться по суміжному плато. Прилади на апараті «Вікінг-2» в 1979 р. зареєстрували випадання снігу, який пролежав на поверхні кілька місяців (Рис. 8.4, праворуч). В атмосфері Марса за даними експерименту з планетним Фур'є спектрометром на КА «Марс-Експрес» вперше експериментально була отримана детальна будова атмосфери в області низхідної гілки осередку Хедлі у районі північної полярної області планети у кінці полярної зими.

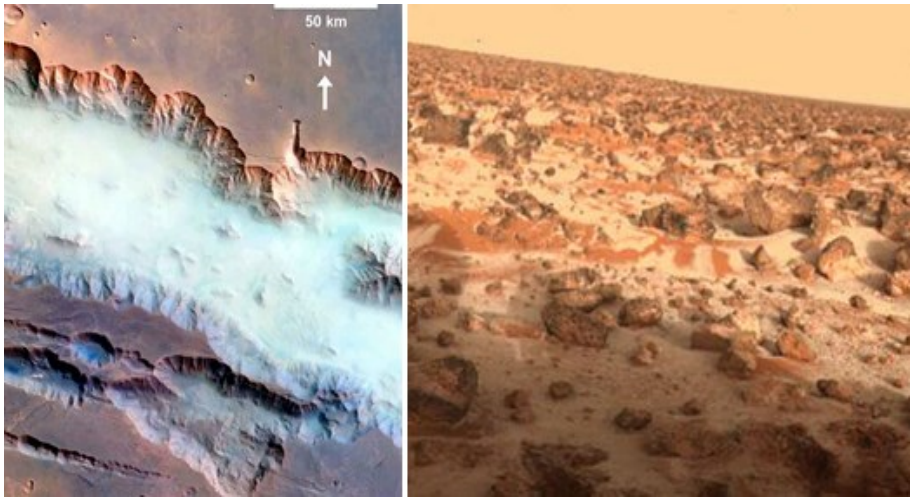


Рис. 8.4. Зображення ліворуч показує вранішній туман з водяного льоду в області Noctis Labyrinthis у Valles Marineris; праворуч – видно сніг на поверхні у місці посадки «Вікінг-2» (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Температурне поле атмосфери Марса в залежності від висоти і широти досліджувалося на центральних меридіанах, що проходили через області Ascaeus Mons (10°N) і Alba Patera (40°N) Було знайдено, що на краю полярної шапки розташовувались щільні крижані хмари і там існує інверсія в температурному профілі на висоті біля 20 км. Вона спостерігається на широті вище +48N. Тоді як край полярної шапки, що складається переважно з льоду CO₂, знаходиться на широті вище 62°N. Температурна інверсія в області висот 10-20 км раніше не була навіть передбачена теоретичним моделюванням.

Проте в певний момент часу характер циркуляції атмосфери Марса почав суттєво змінюватися. Змінилася також і будова атмосфери, хоча при цьому полярна шапка відступила всього на 3°, а температура поверхні залишилася такою ж. Однак слід відмітити, що за час досліджень температурна інверсія в крайовій області полярної шапки більше не спостерігалася. В обох спостережуваних випадках край полярної шапки був покритий шаром хмар із середнім розміром частинок близько 4 мкм.

Очевидно, температурна інверсія на висоті близько 20 км пов'язана з низхідною гілкою осередку Хедлі. По вимірюваннях з цим же Фур'є спектрометром у кінці

марсіанського літа у південній півкулі було отримано також розподіл крижаних хмар і пилу на орбітах, що проходили через області Фарсіда і Хеллас. Результати дозволили зареєструвати достатньо високий вміст однорідно перемішаного пилу на широтах $<70^\circ$, за винятком південних широт 30°S . Крижані хмари спостерігалися також у північній полярній області над областями Олімп, Ascræus Mons і Alba Patera. Ефективний радіус частинок хмар оцінено в 1-3 мкм, а їх візуальна оптична товща – була рівна 0.2-0.4 над горою Олімп і 0.1-0.6 над областю Ascræus Mons. Над Ascræus Mons хмари з водяного льоду спостерігалися на південному схилі з максимальною оптичною товщиною над вершиною вулкана [118] з південного боку. А над горою Олімп хмари були знайдені по обидві сторони від вершини [37].

9. Пилові бурі на Марсі

Марс – наступна від Сонця після Землі планета. Доволі значний ексцентриситет орбіти Марса $e=0.0933$ приводить до того, що відстань від Марса до Сонця змінюється від 207 млн км у перигелії до майже 250 млн км в афелії. Орбіта Землі також має деякий ексцентриситет. Тому умови спостереження Марсу [61, 91, 97, 132] з поверхні Землі залежать від того, наскільки він близький до перигелію, чи до афелію.

Якщо протистояння між планетами припадає на перигелій, то відстань між Марсом і Землею буде найменшою (до 56 млн км) і таке протистояння називають великим. При афелійних протистояннях відстань сягає 101 млн км. Тривалість сидеричного року на Марсі становить 686.98 земної доби. Найкраще Марс видний на небі нашої Землі якраз в періоди протистоянь. І в такі моменти він інколи може бути дещо яскравішим за Юпітер. Весна у кожній з півкуль Марса – є часом зародження пилових бур у відповідній півкулі після танення там снігу і льоду і випаровування замерзлого у зимових навколополярних областях вуглекислого газу (Рис. 9.1).

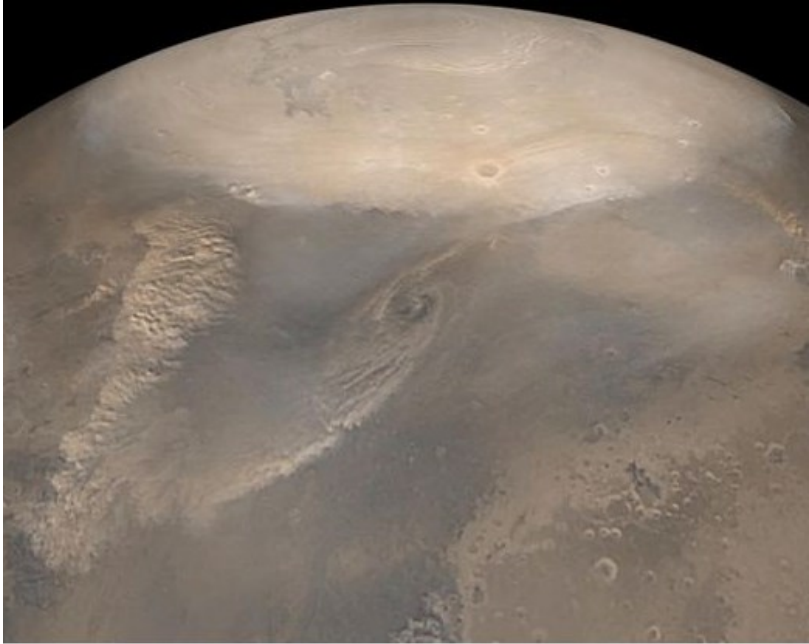


Рис. 9.1. Утворення пилової бурі у північній півкулі. Протягом зими замерзлий двоокис вуглецю покриває основну частину північної полярної області (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Декілька чинників, накладаючись, приводять до виникнення пилових бур [29, 62, 64] у відповідній півкулі. Так, атмосферний тиск [49] там дещо збільшується при сублімації замерзлого CO_2 ; у щільнішій атмосфері легше піднімається і довше тримається пилова складова [91, 139]; саме тоді встановлюється високий температурний контраст між вкритою вуглекислотою памороззю та поряд розташованою поверхнею, яка тільки но відтанула [137, 144]. Це приводить до підсилення вітрів, які дмуть від країв полярної шапки у бік середніх широт.

Аналогічним чином виникають вітри від високих центральних областей полярних шапок до темніших низьких і тепліших навколишніх областей [129].

Пилові бурі відіграють важливу роль у формуванні марсіанського клімату [13, 70, 112, 126]. Адже саме глобальні шторми міняють тепловий баланс планети і хід намерзання й випаровування полярних шапок.

Вони також впливають на розподіл водяної пари [98, 101, 146, 150]. Регіональні бурі (Рис. 9.2), особливо полярні, впливають на швидкість сезонних змін у цих шапках і задають основні параметри місцевої погоди.

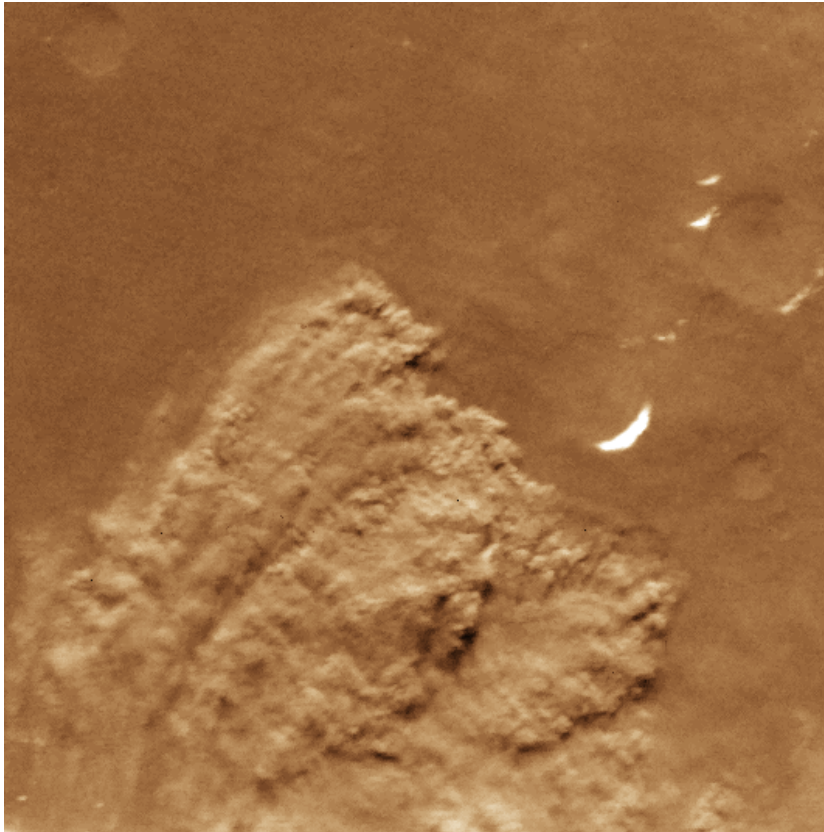


Рис. 9.2. Локальна пилова буря, утворена біля краю південної полярної шапки, де вітри – найсильніші (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Тобто, дуже тонкий пиловий шар на марсіанській поверхні створює досить сприятливі умови для виникнення пилових бур. Для підйому пилової складової в умовах Марсу потрібна швидкість вітру $\sim 25\text{-}30$ м/с [29, 109, 128]. І на Марсі існують області, де такі величини швидкості вітрів спостерігаються. Найпотужніші смерчі утворюються переважно поблизу перигелію орбіти Марса. У цей час інтенсивність інсоляції поверхні майже на четверть більша, ніж у моменти «середнього» протистояння, та майже у півтора рази більша, ніж при перебуванні в афелії. Саме тому глобальні пилові бурі найчастіше виникають у періоди великих протистоянь, коли літо у південній півкулі збігається із

проходженням Марса через перигелій. Притягування від Землі суттєво збільшує цей ефект. Хвиля потемніння ділянок поверхні, що спостерігається зі зміною сезонів [105, 113], пояснюється зміною напрямку вітрів, які постійно дмуть у напрямку від одного полюса до іншого. Вітер піднімає у повітря верхній шар сипучого матеріалу – світлого пилу, оголюючи ділянки темніших порід. У періоди, коли Марс проходить через перигелій орбіти, порушується загальна рівновага марсіанського середовища. Саме у цей час швидкість вітру підсилюється до 20-30 м/с, починають закручуватися атмосферні вихорі (Рис. 9.3) і підіймаються пилові бурі.

Інколи, більше мільярда тон пилу може підніматися в атмосферу і утримуватися там у зваженому стані протягом досить тривалого часу [135]. Тривалість пилових бур іноді досягає від 50 до 100 земних діб. При цьому різко змінюється загальний кліматичний стан на всій планеті. Адже під час пилових бур на Марсі виникає так званий «антипарниковий» ефект. Це викликається тим, що пилові хмари не пропускають сонячних променів у видимому спектральному діапазоні до поверхні, проте пропускають випромінювання теплового діапазону, котре виходить від неї. По цій причині поверхня планети сильно охолоджується, тоді як атмосфера – суттєво розігрівається [70].



Рис. 9.3. Утворення циклонних вихорів на краю полярної шапки на Марсі. На передньому плані видно яскраві області замороженої води (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Уточнення хімічного складу марсіанської атмосфери і детальне вивчення так званої «рози» вітрів за допомогою космічних апаратів [100] – дозволило виявити роль полярних шапок у формуванні пилових бур. Адже, саме при таненні полярних шапок утворюються величезні маси вуглекислого газу, які приводять до помітного збільшення атмосферного тиску над ними.

У результаті таких процесів утворюються досить сильні вітри, які піднімають з поверхні дрібні частинки пухкого марсіанського ґрунту. Тобто, утворення смерчів пов'язане з підйомом повітряних мас від нагрітого Сонцем марсіанського ґрунту. Проте сам вихор вперше вдалося побачити лише на початку XXI століття шляхом порівняння кількох послідовних знімків з одного з посадкових модулів. Явища, подібні марсіанським пиловим бурям, відбуваються й на Землі: це так звані торнадо й водяні смерчі. Проте поява темних слідів на поверхні Марса (Рис. 9.4) довгий час пов'язували з можливими слідами життєвих форм [85, 111, 117]. І тому це представляло нерозв'язану загадку для дослідників. Тепер стало ясно, що ці сліди залишають невеликі марсіанські пилові смерчі.

Зриваючи верхній світлий шар, вихорі залишають на поверхні планети темні сліди. В основному, процес їх утворення пов'язаний з нагріванням поверхні протягом сонячного дня, і з наступним підняттям теплого повітря. Нагріті повітряні маси починають обертатися і переміщуватися, втягуючи в себе верхній шар світлої пилової маси. Коли пил потрапляє в такий вихор, він стає видимим у вигляді торнадо.

На Землі такі структури проявляються в менших масштабах і за часом свого існування не перевищують декількох хвилин.

На Марсі – пилові вихорі можуть досягати кілометрової висоти і, звичайно, з'являються не поодиночі, а десятками [29]. Швидкість обертання таких пилових вихорів часто перевищує 30 м/с, і вони можуть за секунди знизити видимість поверхні до нуля.

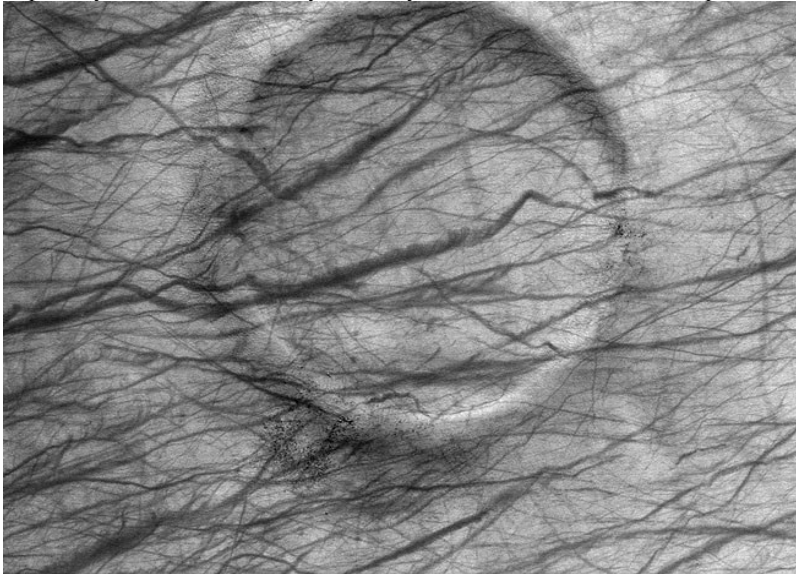


Рис. 9.4. Темні сліди від вихорів на поверхні Марса (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Але в більшості випадків, атмосфера Марса переважно дуже прозора і лише інколи (в періоди пилових бур) видимість деталей поверхні, і навіть величезних вулканів [118], сильно послаблюється, або й зовсім щезає.

10. Про механізми можливого періодичного перерозподілу водяного льоду між полярними шапками Марса.

На початку XXI століття у Північній полярній шапці було підтверджено наявність значної кількості водяного льоду (Рис. 4.1, ліворуч). Дещо пізніше, спектрометром у видимому та інфрачервоному діапазоні «ОМЕГА» на орбітальному апараті «Марс Експрес» [100] також вдалося зареєструвати значні відкладення водяного льоду навколо Південного полюса [4]. Вони розташовуються поверх осадових порід [144] віком у кілька мільйони років. Це вказує на відносно недавнє переміщення льодовиків. Над водяним льодом у Південній полярній шапці (Рис. 4.1, праворуч) є поверхневий шар «сухого льоду» CO_2 товщиною лише 2-7 мм. Тоді як у Північній полярній шапці шар замерзлої вуглекислоти на порядок більший [16].

А за допомогою гамма-спектрометра була виявлена велика кількість водню під поверхнею Марса у полярних і помірних широтах, та навіть на великих відстанях від полярної шапки [44]. Цей водень входить до складу водяного льоду. А отже, виявлені запаси води в обох півкулях можуть бути величезними [91, 101, 102].

Останні спостережні дані показали, що льодовики з водяного льоду існують також на середніх широтах Марса (особливо в кратерах високих вулканів [118, 119, 123]) і навіть в екваторіальній області. У таких місцях водяний лід є захищеним від сублімації ґрунтовими покриттями із ізоляційних порід, пилу [59-62, 64] та уламків порід.

Через сучасні температурні умови, лід на Марсі прагне не танути, а замерзати до поверхні і через це поступово підніматися над середнім рівнем поверхні. Зазвичай такого типу замерзлі льодовики повторюють основний рельєф поверхні [118, 125, 128, 132, 137] (Рис. 10.1). Як показали дистанційні спостереження [59], при піднятті літніх пилових бур [139] вітром пил піднімається досить високо в атмосферу. Там він сезонно переміщується в атмосфері із вуглекислого газу та невеликих кількостей водяної пари, а потім знову осідає на поверхню. По цій причині пил сезонно накопичується у шаруватих відкладеннях в обох полярних регіонах (Рис. 4.1). Підтвердженням цього факту вважали спостережувану закономірність при формуванні окремих шарів намерзання в приполярних областях. Це засвідчує періодичні зміни у їх формуванні. Й це є відображенням деяких кліматичних змін, викликаних, наприклад, наявністю ексцентриситету орбіти Марса [138]. Влітку кожного наступного марсіанського року при випаровуванні порівняно тонкого шару вуглекислоти відкриваються глибші шари із замерзлого водою [120, 144]. Протягом літа водяний лід знову покривається тонким шаром пилу та «сухого» льоду.

Через ексцентриситет орбіти Марса ($e=0,09$) під час зміни пір року на планеті [87, 97] спостерігається асиметрія змін сонячного потоку до протилежних півкуль між афелієм та перигелієм на 40 %. З цієї причини в афелії літо у Північній півкулі є довшим та холоднішим, ніж у Південній. Наявність таких відмінностей у фізичних характеристиках нижніх шарів атмосфери [20, 96, 128] приводить до конденсації водяної пари в атмосфері на висотах менших від 10 км. Тому там домінують спрямовані до екватора повітряні потоки при глобальному конвективному переносі [119].

Це приводить до появи тропічного поясу хмар при перебуванні Марса в афелії. Він утворюється за участі води, яка випарувалась із Північної полярної шапки. У моменти, коли Марс перебуває поблизу перигелію, на планеті спостерігаються значно тепліші умови. Тоді хмари майже не утворюються, і перенесення атмосферних мас [98] між півкулями майже не відбувається. З цієї причини вода, яка випарувалася із Південної полярної шапки, переміщується в атмосфері значно рівномірніше, без суттєвого переміщення по планеті.

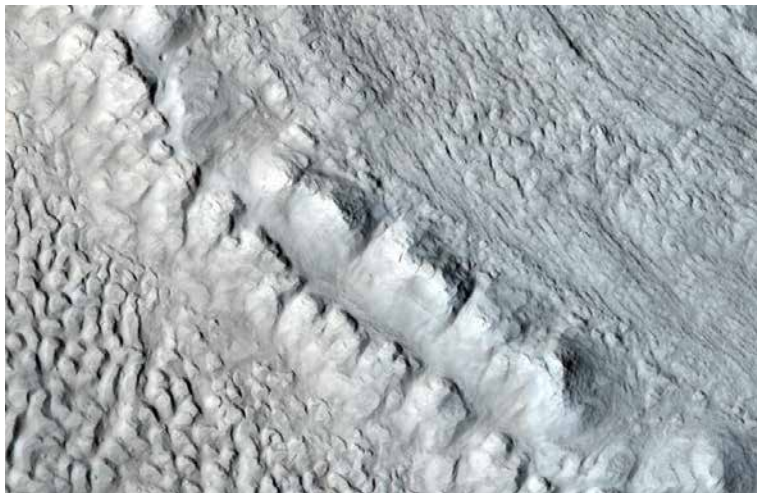


Рис. 10.1. Крупний план льодовика в Ismenius Lacus, як його бачить «HiRISE»; його місце розташування 42.2 N та 49.4 E (http://www.uahirise.org/ESP01_8857_2225).

Завдяки такій відмінності сезонних характеристик між північною та південною півкулями подібний сезонний «насос» за геологічно короткий проміжок часу може повністю «перекачати» воду до полярної шапки у тій півкулі, в котрій літо припадає на момент проходження афелію орбіти. Ретельне моделювання кліматичних процесів на Марсі показало, що процеси відкладення водяного льоду могли циклічно його перерозподіляти між північною та південною полярними шапками Марса протягом останніх 21000 років (Рис. 10.2).

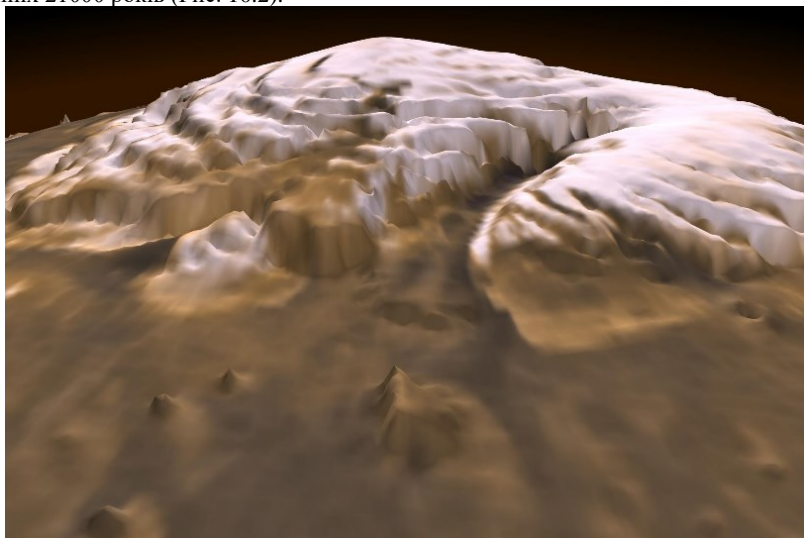


Рис. 10.2. Північна полярна шапка показана в комп'ютерній реконструкції за результатами спостережень з лазерним локатором; вертикальний масштаб збільшено у 100 разів (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Такий інтервал часу було розраховано виходячи із коливань нахилу осі обертання планети (прецесії). Результати цього моделювання показали, що протягом вищенаведеного часу вода в Північній полярній шапці перебувала в досить нестабільних умовах, і тому могла переміщуватися до Південної полярної шапки у вигляді пари; там вона знову конденсувалася на поверхню. Це привело до накопичення протягом року у Південній полярній шапці водяного льоду товщиною до 1 мм.

За 10 тисяч років це призвело до утворення шару водяного льоду товщиною майже у 6 м. Приблизно 10 тисяч років тому цикл прецесії планети змінився й почалося його повернення до теперішньої конфігурації. Біля 1000 років тому вуглекислий газ знову розпочав сезонно намерзати поверх шару водяного льоду у Південній полярній шапці та блокувати рух водяної пари до протилежного полюса.

Виходячи з того, що нахил осі обертання Марса міг змінюватися багато разів у так званих циклах Міланковича з періодом у 10^5 років, можна вважати, що описана вище асиметрія зараз є відносно молодого і навіть може змінювати знак.

Непрямою ознакою подібної зміни глобального кругообігу води між півкулями є концентричні шаруваті відкладення в обох полярних шапках (Рис. 4.1).

Цілком можливо, що протягом історії Марса вигляд полярних шапок багато разів обмінювався місцями. Останнім часом вважають, що інтенсивний локальний обмін водяного льоду є необхідною умовою для стабілізації глобального кругообігу води. Водночас він відіграє роль своєрідного дисипативного фактору. Якби марсіанський реголіт не міг «дихати», то сезонна міграція води навіть до екватора була б неможливою. Адже тоді вода навіть на межі полярних шапок відразу потрапляла б у своєрідні холодні пастки.

11. Вулкани Марса.

Спостереження Марса з допомогою апаратури з космічних апаратів [91, 99] виявили виразні сліди вулканізму [106] та тектонічної діяльності: ущелини із каньйонами та розломи; деякі із них у довжину мають кілька сотень кілометрів, десятки – у ширину й кілька – у глибину (Рис. 11.1).

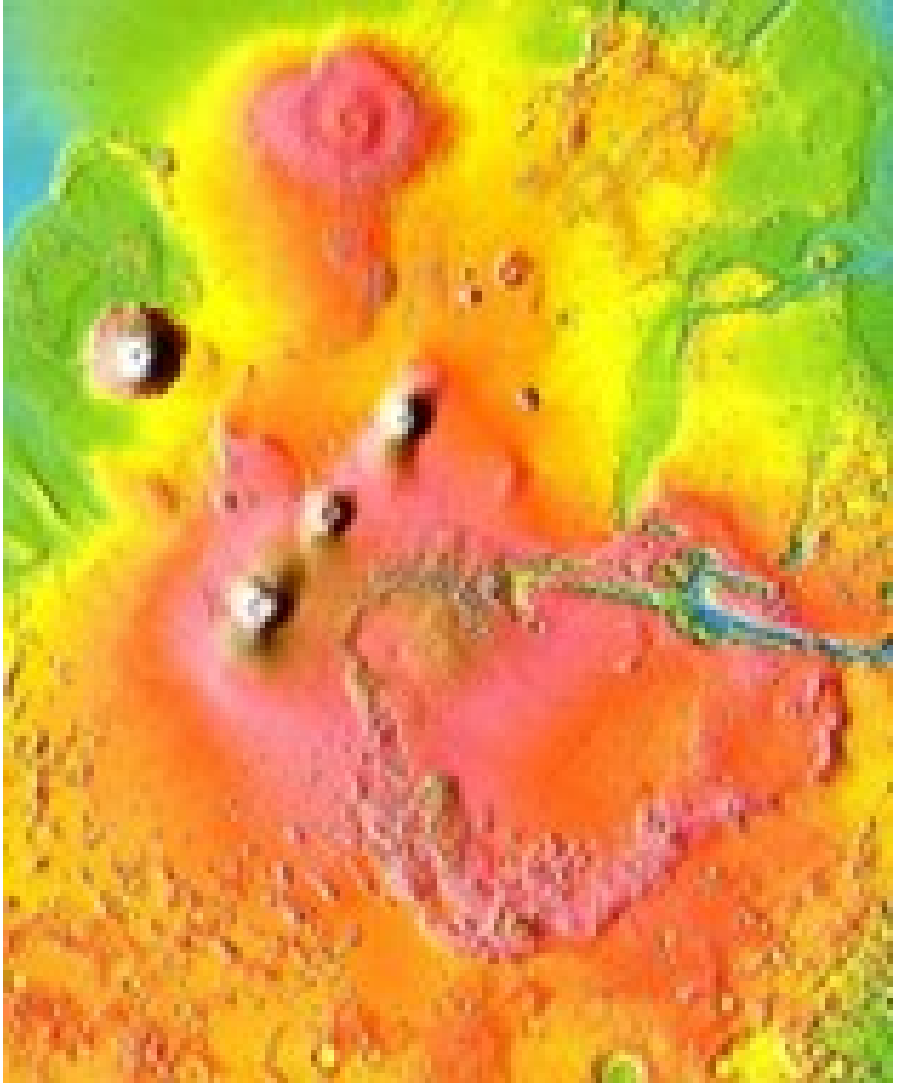


Рис. 11.1. Три велетенські вулкани в області Tharsis, вулкан Олімп і долина Марінера (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Дані вулканічні області розташовуються на західному та східному кінцях обширної системи каньйонів, якими є долини Марінерів. Вважають, що вона могла виникнути в результаті розлому, при насуванні регіону Tharsis (Рис. 11.1). Вже найперші зображення, які були передані з космічного апарата “Марінер-4”, показали, що поверхня Марса дрібними деталями (Рис. 11.2) [135] нагадує супутник Землі Місяць.



Рис. 11.2. Марсіанська поверхня з відносно великими й малими кратерами й долинами (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Вигляд цих деталей доповнено пізнішими місіями і посадочними модулями (Рис. 11.3). Всюди на поверхні планети лежать кам'яні брили червонуватого кольору (мабуть через значні домішки окислів тривалентного заліза), які є шматками вулканічних порід, утворених при падінні метеоритів, чи при ерозійних процесах.

За винятком існуючих там рівнин, вся інша поверхня Марса є сильно кратерованою [30 8]. Кратери виглядають більш зруйнованими від Меркурія чи Місяця [84]. Виявилось, що у південній півкулі – кратерів знайдено значно більше, ніж у північній. За своїм походженням всі кратери поділені на ударні (метеоритні) та вулканічні, а за своїм віком – на молоді та старі.

Майже половина поверхні Марса виявилася вкрита старими кратерами, а інша половина – молодими та рівнинними відкладеннями [32, 35, 61]. Найбільш насиченими кратерами виявилися південні райони планети. Але розташовані там в середині гігантських кільцевих структур Hellas Planitia [111, 115] та Argyre Planitia, характеризуються мінімальною густиною кратерів.

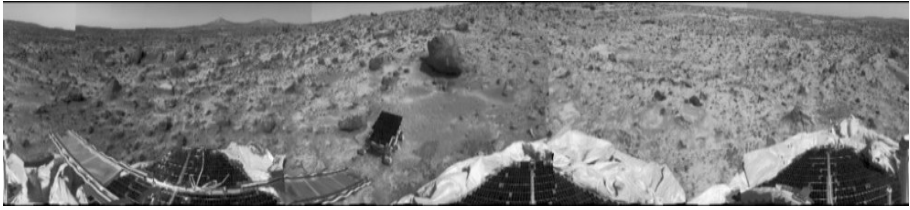


Рис. 11.3. Панорама місця посадки апарата «Пасфайндер»
(<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Отримані результати показали, що форму вулканічних та ударних кратерів є дещо різна. Так, ударні кратери є майже круглими, мають кільцевий вал з характерною структурою, внутрішню і зовнішню тераси. А в залежності від розмірів, вони можуть мати ще й центральну гірку (великі кратери) і внутрішній вал (надзвичайно великі). Вулканічні кратери мають гладкі краї, а довкілля покриті лавовими потоками; часто вони знаходяться на вершині куполоподібних підвищень (Рис. 11.4).

Яскравими представниками вулканічних кратерів є кратери на вершинах найвищих чотирьох гір (Olympus, Arsya, Pavonis і Askraeus).

Практично всі великі кратери вкриті дрібнішими (Рис. 11.5). Але небагато свіжих великих ударних кратерів з розвинутим полем викинутого матеріалу і променевими системами. У більшості з них поле викиду є помітно зруйноване, чи засипане пізнішими викидами. Характерною рисою молодших кратерів є значні шари викидів довкола них і порівняно низькі гребені на їх зовнішніх краях. А на молодих лавових потоках спостерігається втричі більше вторинних кратерів, ніж на рівнинних чи гірських місцевостях, і в 10 разів більше, ніж на старих ділянках поверхні.

Молоді кратери (всього знайдено 1558) були розділені на 6 типів [68]. До 1-го віднесли кратери діаметром до 10 км з одним валом; до 2-го – дещо більшого розміру з двома валами; до 3-го – оточені маленькими кратерами; до 4-го – з радіальною текстурованою структурою зовнішніх валів, розміром 10-30 км.

Кратери діаметром менше 10 км не мають такої структури, а структура кратерів діаметрами більше 30 км значно складніша, і їх відносять до 5-го типу. До 6-го типу належать так звані «млинеподібні» кратери діаметром менше 5 км.

На молодих лавових потоках спостерігається втричі більше вторинних кратерів, ніж на рівнинних чи гірських місцевостях, та в 10 разів більше, ніж на старих ділянках поверхні. Всі вулкани Марса ділять на 3 типи: великі вулканічні утворення типу щитових вулканів, куполи й провальні кальдери чи патери. Завдяки наявності останніх структур Марс помітно відрізняється від Місяця і Меркурія. Морфологія лавових потоків навколо вулканів в області Tharsis свідчить про низьке значення в'язкості лави.

Розрахункові оцінки виходу лави з марсіанських вулканів, на прикладі гори Arsya, складають $3.5 \cdot 10^5$ м³/с. А в'язкість лави нижча, ніж у місячних морів, і значно нижча від лави земних вулканів. Тому при меншій силі тяжіння, лава на Марсі розтікається на значно більшу відстань.

Дані щодо щільності кратерів на схилах великих вулканів Марса говорять про їх порівняно молодий вік: Arsya – 400 млн, Олімп – 300 млн, Askraeus (Рис. 11.6) – 400 млн і Pavonis – 300 млн років [123, 127]. Ці вулкани Марса вражають своїми масштабами, а їх схили порізані радіальними системами лавових потоків, каналів і гряд, шириною в кілька і завдовжки в сотні кілометрів.

Вони більші від земних на один-два порядки і їх лавові потоки набагато довші (Рис. 11.5).

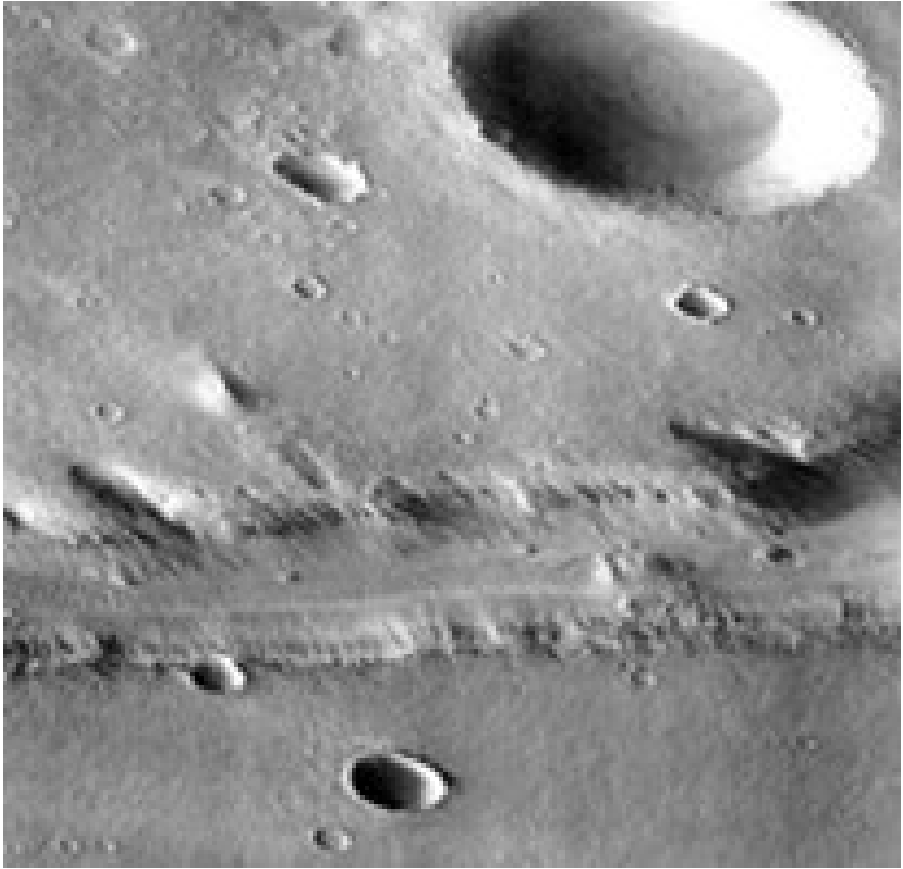


Рис. 11.4. Марсіанська поверхня з відносно великими й малими кратерами й долинами; праворуч – вулкан Apollinairs Patera (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Причина в тому, що гарячі вулканічні області під корою планети протягом сотень мільйонів років зафіксовані в одному місці поверхні планети. А на Землі тектонічні плити рухалися уздовж досить гарячих вулканічних регіонів і тому не дозволяли сформуватись вулканам великих розмірів.

Окрім гігантських щитових вулканів, на поверхні Марса є скромніші за розмірами, але численніші вулканічні структури – так звані вулканічні куполи (Рис. 11.7).

Більша їх частина також розташована в області Tharsis. Висота їхніх куполів не більша від 8 км, а їхні вершини досить часто ускладнені кількаярусними депресіями за типом кальдер. В області Elysium знаходиться найбільший на всьому Марсі вулканічний купол Геката. Він має поперечник у 200 км.

На відміну від щитових вулканів великих розмірів, вони характеризуються значно більшою поверхневою густиною ударних кратерів та більшим відношенням діаметра кальдер до поперечника куполів. Можна вважати, що принаймні частина куполів в області Tharsis є залишками стародавніх і більших вулканічних утворень, частково закритих пізнішими виверженнями.

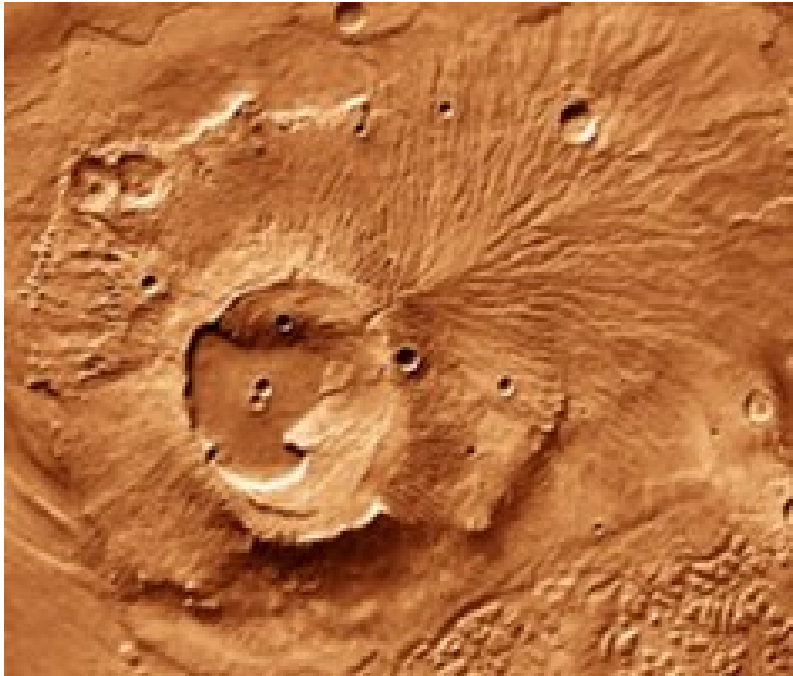


Рис. 11.5. Вулкан Apollinairs Patera на марсіанській поверхні з координатами $\varphi=8^{\circ}\text{S}$, $\lambda=186^{\circ}\text{W}$ (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

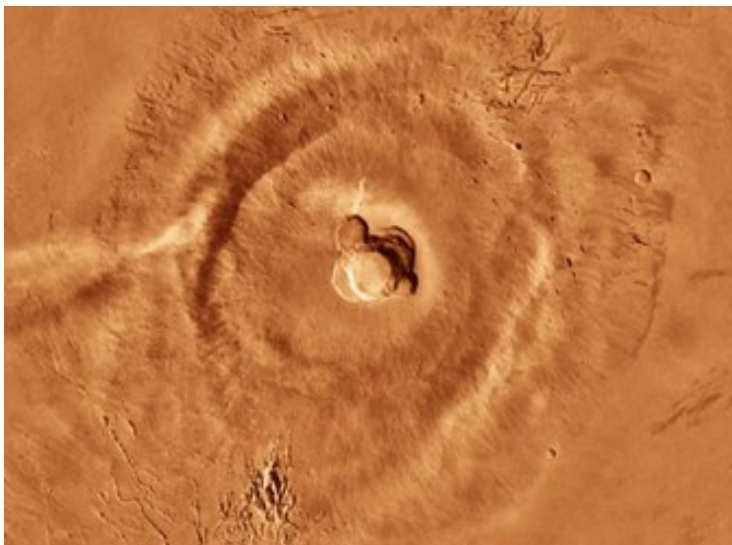


Рис. 11.6. Кальдера вулкана Ascraeus Mons складена з декількох дискретних провалів; нижня стіна кальдери має висоту понад 3 км (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Куполи менших розмірів, ніж у щитових вулканів, є опуклішими і мають крутіші підйоми. Відмінності між купольними й щитовими вулканами можуть полягати в тому, що вивержений з куполів матеріал був більш в'язким, або ж виверження, які сформували куполи, були меншого об'єму і тому потоки лави накопичилися ближче до їх джерела. Наступним типом вулканів є Paterae різних форм [118]. Нахил їхніх схилів незначний, вони мають радіальні канали на схилах, деякі – помітно змінені ерозією.

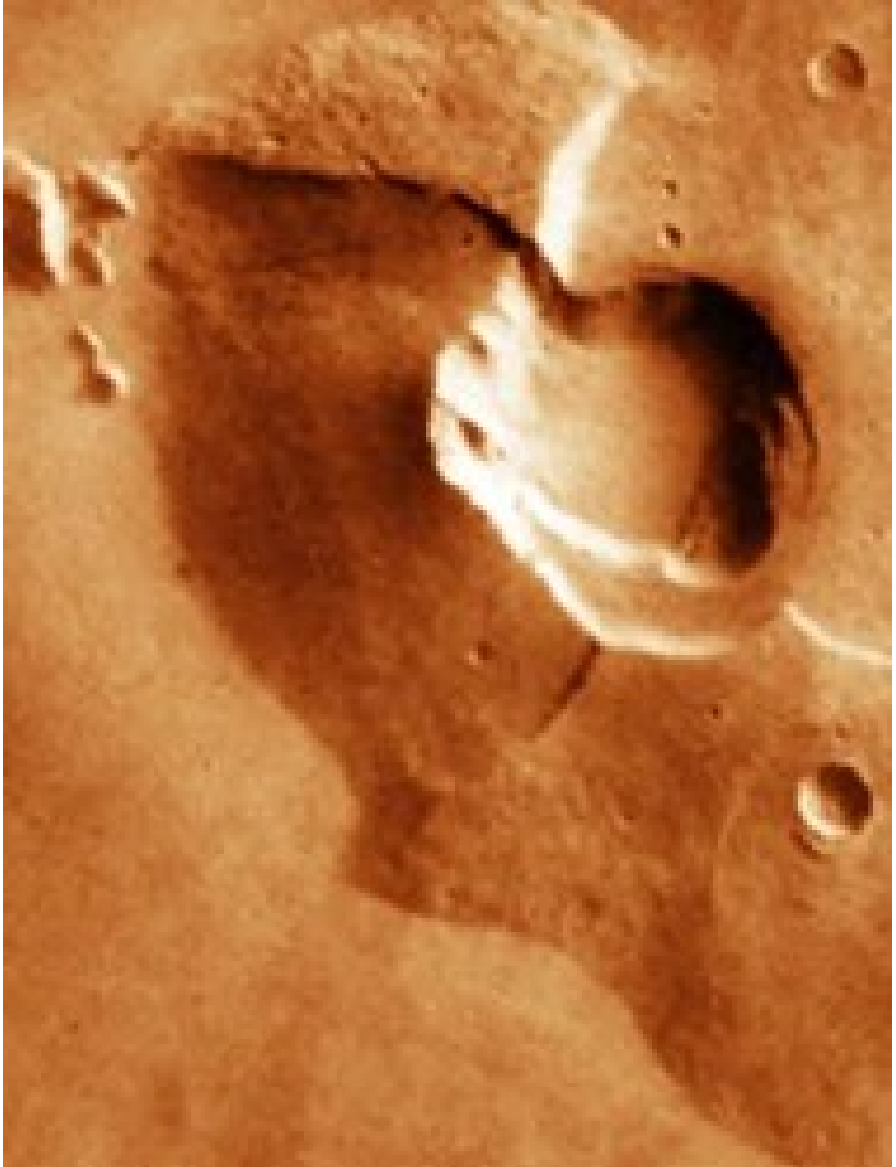


Рис. 11.7. Один з куполів в області Tharsis Tholus (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Через сильну чутливість до ерозії можна вважати, що вулкани-патери складені з легких матеріалів типу потоків золи. Унікальною серед них є патера Альба (Рис. 11.8). Своїми розмірами (поперечник у 1600 км) вона співставна з вулканом Олімп. У неї є центральна кальдера. Але її висота не вища 3 км над навколишніми рівнинами.



Рис. 11.8. Купол вулкана Alba Patera (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Вважають, що вона була сформована потоками лави, котрі були або ж значно потужнішими, а можливо, що були суттєво тривалішими від подібних потоків в інших регіонах. Досить значна ерозія в деяких патерах також дозволяє припустити, що вони є найбільш старими вулканами на Марсі.

Не виключають, що активність вулканів на Марсі зберігалася значно довше, від попередніх оцінок. Нові оцінки, одержані з підрахунку числа вулканічних кратерів на зображеннях з КА «Марс Експрес», свідчать, що вулкани могли діяти всього 1-20 млн. років тому.

Тоді як до того часу їх тривалість оцінювалась у межах від 500 до 600 млн. років. Найдовше вулкани діяли в області Tharsis (вулкан Олімп і три інші великі вулкани). Відзначали навіть, що активність вулканів продовжується і в наші дні. Тому слід шукати ознаки гідротермальної активності планети. Космічний апарат «Марс реконнейсенс орбітер» вперше зареєстрував схожі на гідротермальні джерела горби в кратері Vernal в області Arabia Terra. Вони є невеликої висоти і мають еліптичну форму. І своїм виглядом ці утворення є дуже схожими на гарячі джерела в Австралії. Показані на Рис. 11.9 підвищення можуть бути грязевими вулканами на Марсі. Їх інфрачервоні зображення свідчать, що ці горби остигають швидше за навколишні гірські породи, через те, що вони є висохлою гряззю.

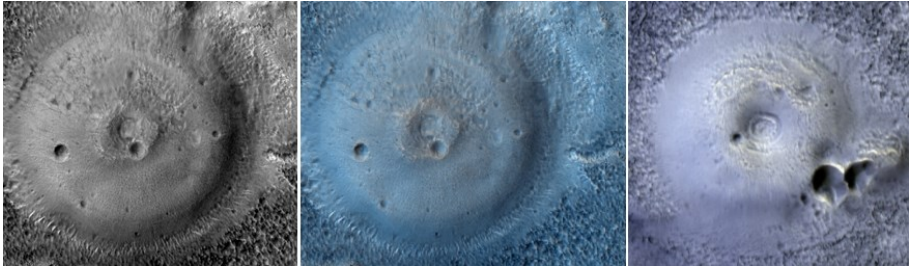


Рис. 11.9. Можливі грязеві вулкани діаметром більше 100 м на північних рівнинах Марса в районі Acidalia Planitia. Це високо альбедні утворення (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

І кольори таких горбів узгоджуються із припущеннями про те, що вони були сформовані у присутності води [101, 120]. Струмені газу, що містить метан, можуть бути викидами грязевих вулканів [98], якщо лише ця тепла грязь містить мікроорганізми [116, 117], які можуть продукувати метан. Зазвичай конуси знаходять поблизу таких великих марсіанських вулканів, як Олімп, поряд із якими також є «сухі» русла.

На цій основі вважали, що конуси були утворені унаслідок нагрівання теплом від вулкана розташованого під шаром льоду. І коли лід випаровувався, то водяною паром пробивалися у ґрунті отвори, через які пара виходила на поверхню. Якщо показані на Рис. 11.9 підвищення є грязевими вулканами, то саме тут варто шукати сліди діяльності мікроорганізмів [115].

Amazonis Planitia представляє собою рівнину в північній екваторіальній області Марса. Вона є досить молода, з віком порід по 10-100 млн років. Частина даних порід є застиглою вулканічною лавою.

Вулканів, що мають вигляд гір із кратерами в їх центрі – в цій області немає, а тому лава напряму виливалась із тріщин у марсіанській корі. Особливо цікавим є те, що були знайдені сліди великих розливів лави, які відбувалися тут неодноразово [112]; причому лава текла по тій же системі протоків, що й вода (або лід). На підставі вивчення таких багатощарових структур, які утворилися при повторних виверженнях, було зроблено висновок про можливість вулканічних процесів на Марсі і зараз.

Вже перші дослідження Марса марсоходом «Опорт'юніті» показали правомірність твердження про переважне вулканічне формування рельєфу поверхні Червоної планети. Вони підтвердили, що марсохід знаходиться на ґрунті із піщаної пошарової структури із вкрапленими сферичними гранулами (Рис. 11.10). Ці гранули явно вулканічного походження, оброблені струменями газу, що виходять з мантії планети.

На відміну від водних розчинів земних вулканодів, текучість грязьової лави на Марсі можуть визначати рідини таких можливих типів: сірковуглець (CS_2), хлорвуглець (CCl_4), хлористий ангідрид (Cl_2O_7). Блискуча поверхня гранули може визначатися перерахованими речовинами. Але остаточний склад рідкої складової марсіанських вулканодів можливо визначити тільки хімічним аналізом. Переважна частина вулканізму там сталася 3-4 млрд років тому. Але є і свідчення недавньої вулканічної активності на Марсі. Ці вулканічні виверження могли відбуватися протягом останніх 50 тис. років. Використовуючи дані з орбітального супутника навколо Марса, вдалося знайти докази недавнього виверження в регіоні Elysium Planitia (Рис. 11.11).



Рис. 11.10. Сферичні гранули – бейди-окатиші на Марсі (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

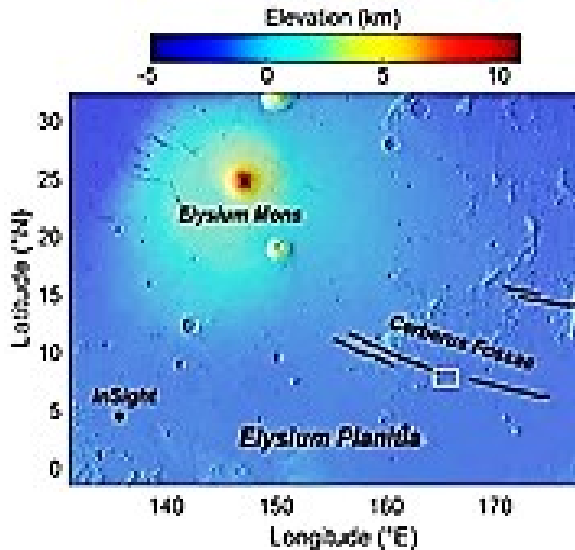


Рис. 11.11. Регіон недавнього вулканізму (біла рамка) та розташування посадочного апарата «InSight» (<https://ostannipodii.com/data/anatoliy/images/-21-05/mars.jpg>).

Це вулканічне родовище має високу теплову інерцію і включає в себе багатий піроксеном матеріал з високим вмістом кальцію. Воно симетрично розподілене навколо системи тріщин Cerberus Fossae в Elysium Planitia, і є нетиповим для солових відкладень в цьому регіоні. Воно схоже на темні плями на Місяці і Меркурії, яким приписують вибухові вулканічні виверження.

Вони покривають навколишні потоки лави і є відносно свіжим відкладенням попелу і гірських порід.

12. Порівняння особливостей ударних і вулканічних кратерів на поверхні Марса.

Геологічні процеси на Марсі дуже різноманітні, а сама його поверхня [44, 61] суттєво відрізняється в окремих регіонах. Вся поверхня характеризується глобальною асиметрією в розподілі низинних областей – рівнин, які складають більше третини всієї поверхні – і підвищених областей, покритих багатьма різного типу кратерами [135]. Велика частина рівнин розташована в Північній півкулі. Границя між ними в деяких випадках представлена особливим типом рельєфу: так званими столовими горами.

Вони складаються з гір і хребтів з плоскими вершинами. Стародавні нагір'я охоплюють Південну півкулю. Вони значно відрізняються від молодших північних рівнин. Тому кратерів на півночі значно менше.

На поверхні планети виділяється плоскогір'я Фарсіда [133]. У середньому воно підняте на 4 км, і займає близько 15% площі всієї планети. Саме на цьому плоскогір'ї знаходяться гігантські щитові вулкани. Один з них – Олімп – є найвищим у Сонячній системі.

Тому кажуть, що поверхня Марса [107] характеризується так званою дихотомією, коли Південна півкуля, є більш древньою і вкритою кратерами, та знаходиться трохи вище. А Північна півкуля на значних площах вкрита рівнинами і дещо занижена.

Всі марсіанські кратери поділяються на вулканічні та ударні (або метеоритні); а за віком – на старі та молоді [112]. Біля половини поверхні Марса вкрито старими кратерами, а іншу половину – молодими кратерами і рівнинними відкладеннями.

Хоча прямої кореляції між насиченістю кратерів і альbedo поверхні [62, 64, 132] не виявлено, інколи все ж можна говорити про непряму кореляцію. Так, на світлих частинах рівнини Еллада [112, 115, 116] і рівнини Аргірі, розташованих в середині гігантських кільцевих структур, щільність кратерів є мінімальною.

Відзначається, що кратери на Марсі метеоритного походження і кратери вулканів дещо відрізняються за формою. Так, ударні кратери – виявилися майже круглими; вони мають круглий вал з характерною будовою, внутрішню та зовнішню тераси; і залежно від розміру вони також можуть мати центральну гірку (для великих кратерів), або своєрідне кратерне заглиблення (для надзвичайно великих).

Вулканічні кратери часто розташовані на вершинах куполоподібних підвищень, мають гладкі краї, оточені лавовими потоками та канавами (рис. 11.5).

Характерною особливістю молодих кратерів [145] є емісійні шари навколо них і низькі виступи на зовнішньому краю. Відповідно до аналізу таких викидів для 1558 молодих кратерів, в [68] запропоновано їх розділити на 6 типів.

До першого типу належали кратери з діаметром, як правило, менше 10 км з одним валом. До 2-го типу – кратери дещо більші, але з двома валами. 3-й тип характеризується наявністю в околицях невеликих кратерів. 4-й тип характеризується радіально текстурованою структурою зовнішніх валів, а їх розміри знаходяться в межах 10-30 км.

Кратери з діаметром менше 10 км не демонструють такої структури, тоді як кратери з діаметром більше 30 км мають набагато складнішу структуру і тому класифікуються як тип 5. Тип 6 включає так звані «млинцеві» кратери, які, як правило, мають діаметри до 5 км. Кратери деяких типів і їх кількість в основному пов'язані з відповідним матеріалом їх основи.

Через вітрову та водну ерозію [146] та періодичні сезонні зміни [113] молоді потоки лави на поверхні Марса показують у три рази більше вторинних кратерів, ніж рівні або гірські території, і в 10 разів більше, ніж старі ділянки поверхні.

Практично всі вулканічні кратери мають гладкі краї, а їх околиці вкриті потоками лави та канавами; часто вони розташовані на вершинах куполоподібних підвищень. Видимими представниками таких вулканічних кратерів є кратери на вершинах чотирьох

найвищих гір Марса: Олімп, Арсія, Павоніс і Аскраеус. Великі кратери здебільшого закриті меншими.

Кратери майже всіх типів не виявляють залежності їх кількості від широти. Винятком є «млинцеві» кратери, які здебільшого спостерігаються на широтах вище 40° в обох півкулях. Однак для різних типів розподіл кратерів сильно відрізняється в залежності від їх розміру. У геоморфологічній класифікації різних типів рельєфу Марса [9] виділяють території з високою, середньою та низькою насиченістю кратерами.

Для цих територій залежність насиченості (на 1 км^2) кратерами різних розмірів також дещо відрізняється. Таким чином, для висот, близьких до нульового рівня, на широтах, розташованих на південь від паралелі $+45^\circ\text{N}$, спостерігається деяка максимальна насиченість кількістю деталей. Другий максимум спостерігається трохи північніше цієї широти на висотах близько -3 км над рівнем з атмосферним тиском [98] на поверхні $P=6,5 \text{ мбар}$.

Вважається, що кратери на цих територіях також відрізняються за віком [39]. Також виявилось, що на поверхні Південної півкулі кратерів значно більше, ніж у Північній. Але було знайдено дуже мало свіжих великих кратерів (рис. 12.1) з добре розвиненим полем викинутого матеріалу та радіальними системами. У переважній більшості з них поле викидів виявилось значно зруйнованим або похованим пізнішими викидами [69, 91, 100].

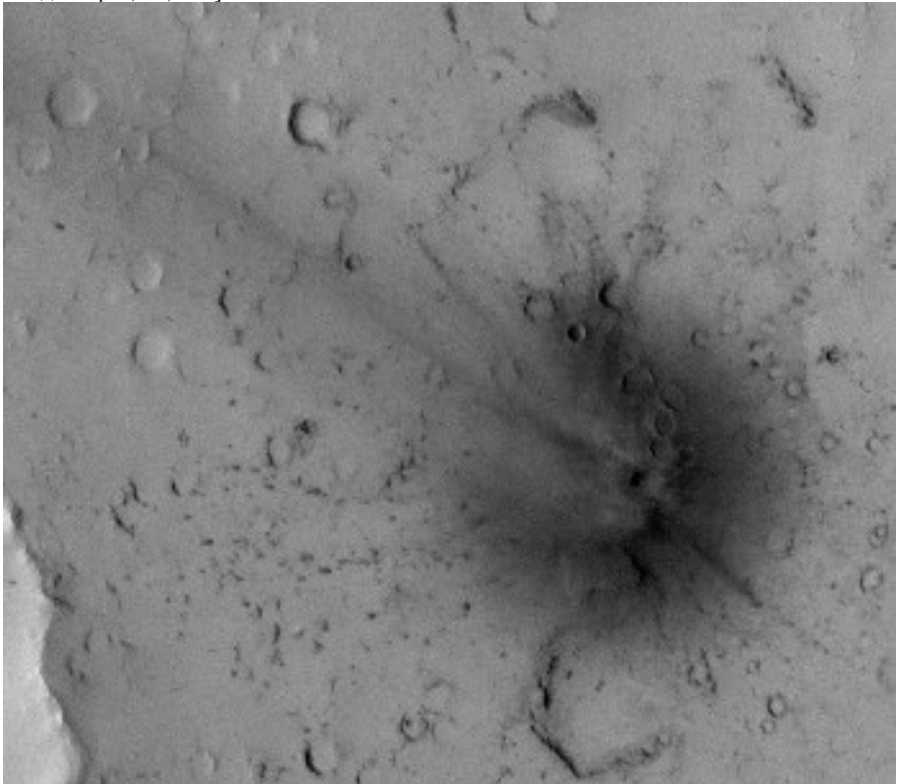


Рис. 12.1. «Свіжий» ударний кратер на поверхні Марса (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Тобто характерною властивістю таких молодих кратерів є свіжі шари викидів навколо них і наявність невисоких хребтів на їх зовнішньому краю. Вважається, що походження каньйонів на Марсі пов'язане з давньою тектонікою планети: з рухом плит марсіанської кори кілька мільярдів років тому.

З ретельних досліджень можна було зробити висновок, що на відміну від Землі, яка розвивається в режимі відомої тектоніки плит, розвиток Марса відбувається в режимі так званої тектоніки плюму. Вважається, що один із гігантських мантійних плюмів утворив піднесену область Фарсіди, а інший, менш потужний, призвів до формування регіону Елізіум.

З якоїсь досі невідомої причини розвиток планети йшов по лінії плюмової тектоніки, а не тектоніки плит. Однією з можливих причин зниження рівня всієї північної півкулі може бути те, що ранній процес тектоніки плит, локалізований у північній півкулі, уповільнився через брак енергії в надрах планети та внаслідок її охолодження. Тому рівнини північної півкулі лежать нижче середнього рівня поверхні планети. Наприклад, Велика Північна рівнина, Рівнини Утопія та Плінія Ацидалійська – мають глибини від 4 до 5 км. А Рівнини Аркадія, Амазонія та Хриси – розташовані на 1 км вище. Западни на марсіанській поверхні схожі на океанічні западини на Землі.

Підповерхневий лід, ймовірно, також відіграв важливу роль при формуванні північних рівнин [99, 101, 120]. Тому в північній півкулі переважають рівнинні поверхні заглиблені на 1-5 км.

У південній півкулі здебільшого поширені піднесені області на висоту від 1 до 3 км. Рівнин там порівняно небагато, і вони не такі великі, як у північній півкулі. Це Рівнини Еллада та Аргір, які мають округлу форму. Ймовірно, вони утворилися в результаті падіння великих тіл на поверхню Марса [85, 86].

Велика частина південної півкулі представлена височинами, вкритими безліччю кратерів. Найбільшою височиною є область Фарсіда, з висотою до 8 км; вона розташована поблизу екватора планети. На висоті від 6.5 до 10 км над нею, в одну лінію підіймаються три згаслих вулкани: Аскрія, Павоніс і Арсія. А найвищим вулканом на Марсі, та й у нашій Сонячній системі, є Олімп, який розташований на північно-західному краю області Фарсіда. Вся область Фарсіди оточена розгалуженою системою розломів. Крутизна схилів деяких із каньйонів тут досягає 20 градусів.

Розподіл висот на поверхні в Західній і Східній півкулях Марса показує, що Західна півкуля в середньому дещо вища за Східну. Площа, зайнята рівнинами, в обох цих півкулях – практично однакова. У східній півкулі знаходиться вулканічна область під назвою Елезійське плато. Також та є три вулкани. І найбільша з них – гора Елізіум – має діаметр близько 150 км і висоту до 14 км.

Окремі невеликі вулкани можна побачити і в багатьох інших районах Марса. Своєрідна область скупчення плоско-вершинних гір розташована в зоні переходу від підвищених областей до рівнин у північній півкулі. Саме тут розташовані плоскі так звані Столові гори: Цідонія, Нілосірт, Протоніл, Дейтероніл. Вони розташовані на ділянці великого кола під кутом 35° до екватора. Це коло відокремлює низинну півкулю планети від піднесеної континентальної півкулі. Регіон Цідонійських Столових гір характеризується скупченням хаотичних форм, пов'язаних із глобальним виступом шириною понад 100 км.

Марсіанські кратери відрізняються від кратерів Місяця і Меркурія меншою глибиною та слідами вітрової й водної ерозії. Найбільші з них: Гюйгенс (діаметр 470 км, глибина близько 4 км), Скіапареллі (465 км, 2 км), Кассіні (411 км, 1 км), Антоніаді (410 км, 0 км), Тихонравов (380 км, -2 км); найглибший кратер – Ньютон – має глибину до 5 км. Деякі молоді марсіанські кратери відрізняються радіальними потокоподібними

викидами ґрунту в місцях можливого танення підповерхневого льоду. Такі викиди ґрунту частіше трапляються в кратерах, розташованих на північних рівнинах.

Найвищими регіонами на Марсі є вулканічні куполи гір на плато Фарсіда і Елезійське плато. Ці вулкани, мабуть, уже неактивні. Але вони, ймовірно, утворилися раніше й були активними набагато довше, ніж будь-які вулкани на Землі. При цьому, гарячі вулканічні точки на Землі з часом змінювали своє розташування через поступовий рух континентальних плит. Тому «побудувати» дуже високий вулкан на Землі в кожному окремому випадку – просто не вистачило часу.

Крім того, нижча гравітація дозволила виверженій речовині утворити набагато вищі структури на Марсі, які не зруйнувалися під власною вагою. Найбільший з гігантських згаслих вулканів, гора Олімп, розташована на північно-західній околиці плато Фарсіда; вона має основу діаметром близько 700-900 км та кальдеру на вершині діаметром до 90 км.

Ще три вулкани (Аскрей, Павоніс і Арсія) розташовані майже по прямій лінії на вершині плато Фарсіда висотою близько 8 км.

Крім того, на Марсі знайдено понад 70 згаслих вулканів. Але всі вони набагато менші за площею і висотою. Це, наприклад, Solis Planum, стародавня вулканічна рівнина, що лежить на південь від долин Марінерів. При візуальному спостереженні всередині цієї ділянки видно темну пляму змінної форми, яку ще називають «озеро»; через це все це утворення отримало назву «марсіанське око».

Amazonis Planitia – рівнина, розташована в північній частині екваторіального регіону Марса. Ця область – порівняно молода, з віком порід від 10 до 100 мільйонів років. Деякі з цих порід є затверділою вулканічною лавою.

Вулканів у вигляді гір з кратерами в центрі – на цій рівнині немає, а тому лава вилівалася прямо з тріщин марсіанської кори. Особливо цікаво, що тут виявлені сліди великих лавових потоків, які тут траплялися не раз; крім того, лава текла по тій самій системі каналів, що й вода (чи лід). На підставі досліджень цих багатошарових структур, що утворилися в результаті повторних вивержень, можна зробити висновок, що, цілком ймовірно, вулканічні процеси відбуваються на Марсі й зараз. І незабаром (через кілька десятків мільйонів років) лава знову зможе текти на поверхні Марса.

Ще один круглий ударний кратер – Argus Planitia – має діаметр 900 км і розташований у південній півкулі Марса. Arcadia Planitia і Utopia Planitia – розташовані в північній півкулі Марса. Місцем посадки космічного корабля «Вікінг-2» стала Utopia Planitia. Панорамні зображення, передані на Землю з цього посадкового модуля, показали поверхню, всіяну багатьма плоскими брилами, що складаються з текстурованих скель.

Інша рівнина – Chryse Planitia – це кругле плато; швидше за все, це також ударний басейн, розташований в північній екваторіальній області Марса.. Саме це місце було місцем посадки іншого зонда – «Вікінг -1».

13. Дуже «свіжі» ударні кратери говорять про замерзлу воду в поверхневому шарі ґрунту.

Розрахунки та спостережні дані показують, що зараз весь Марс скутий вічною мерзлотою [146]. Її товщина навколо екватора становить біля одного кілометра, і до полюсів – зростає до шести [78]. Проте виразні яри, утворені промоїнами від потоків рідини та селевими потоками усередині деяких крупних кратерів [118, 119, 127, 145], говорять про періодичний вихід рідини з розталого шару вічної мерзлоти.

Зміни зовнішнього вигляду деяких ярів, події за декілька років спостережень, вперше відмічені у 2005 р., до теперішнього часу залишаються предметом суперечки: утворені вони рідкою водою, або ж це сліди від осипання сухого ґрунту по крутому схилі. На користь води аргументів значно більше [63, 91, 101]. В цілому ця планета залишається скутою вічною мерзлотою, в якій і прихована вся вода, що колись заповнювала нині сухі русла річок і западини багатьох кратерів.

У 2008 р. автоматична станція «Фенікс» (Рис. 13.1, ліворуч) в районі поблизу північної полярної шапки Марса розкрила своїм міні-екскаватором шар водного льоду на глибині декількох сантиметрів від поверхні.

Порівняння представлених на Рис. 13.1 (праворуч) двох знімків, зроблених на 20-тий і 24-тий марсіанський день перебування апарату «Фенікс» на приполярній частині поверхні Марса, дозволяє прослідкувати ефекти випаровування замерзлих частинок ґрунту [17, 34]. На знімках крупним планом зображено поглиблення, вирите посадочним апаратом в марсіанському ґрунті.

Ці дні сезонно [61, 96, 97, 105, 113, 132] відповідають 15 і 18 червня за земним календарем.



Рис. 13.1. Ліворуч – двигуни посадкового модуля «Фенікс» здули верхній шар з пилу і відкрили замерзлий водяний лід. Праворуч – лід під «лопатою» модуля «Фенікс» (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Невеликі світлі шматочки у нижній лівій частині заглиблення добре помітні на фото ліворуч, отриманому на 20 день; до 24 дня – вони вже повністю зникли. Це явна ознака того, що ці шматочки були льодом, який розтанув. Тут видно явний приклад сублімації, при котрій твердий лід прямо перетворюється в пару, проминувши стан рідини. Лід, який знайшов «Фенікс», лежав на глибині в 7-8 см під шаром бурого ґрунту, недалеко від межі полярної шапки, що зменшилася з приходом заполярного літа.

Деякі розрахунки вказують на те, що лід має бути присутнім й на широтах близько 60°; проте повинен залягати там глибше від 20-30 см під поверхнею. Для перевірки цієї теорії, достатньо розкопати марсіанський ґрунт дещо більше від такої глибини. Останнім на середніх широтах, це робив апарат «Вікінг-2».

Але в кінці 1970-тих років він прокопував марсіанський ґрунт на глибину до 15 см, не докопавшись до льоду якихось 5-15 см. Саме тому ніякого твердого льоду він там не побачив.

На думку авторів роботи [6], Марс міг бути в півтора рази вологішим всього декілька тисяч років тому. Є кілька теорій щодо того, як саме шар такого чистого льоду сформувався під поверхнею Марса. Було запропоновано, що лід на Марсі сформувався таким же чином, як і чисті крижані кришталіки формуються під поверхнею Землі – при «промерзанні» ґрунту.

Розв'язати дане питання допомогла сама природа. Оскільки атмосфера [49, 98, 109] Марса дуже розріджена, то вона практично не захищає планету від ударів об її поверхню метеоритів і астероїдів. По цій причині вони значно частіше долітали до поверхні планети й утворюють там свіжі кратери глибиною у кілька метрів [6, 56, 140]. При проведенні пошуку свіжих кратерів використовували зображення марсіанської поверхні, отримані за допомогою апаратури орбітального апарата «Mars Reconnaissance Orbiter» («MRO»).

Відкриття таких «біло-синіх» кратерів почалося в серпні 2008 р., коли з орбітального апарату досліджувалися зображення будь-яких темних плям, або інших змін, які не були видимі на отриманих раніше зображеннях тієї ж області.

Вже через декілька днів з орбітального апарату «MRO» за допомогою панорамного спектрометра «CRISM» (Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars), що працює у видимій і ближній інфрачервоній ділянках спектра, були отримані спектральні свідчення наявності льоду.

Два з цих кратерів знаходилися всього за 70 м один від одного і утворилися практично одночасно (Рис. 13.2).

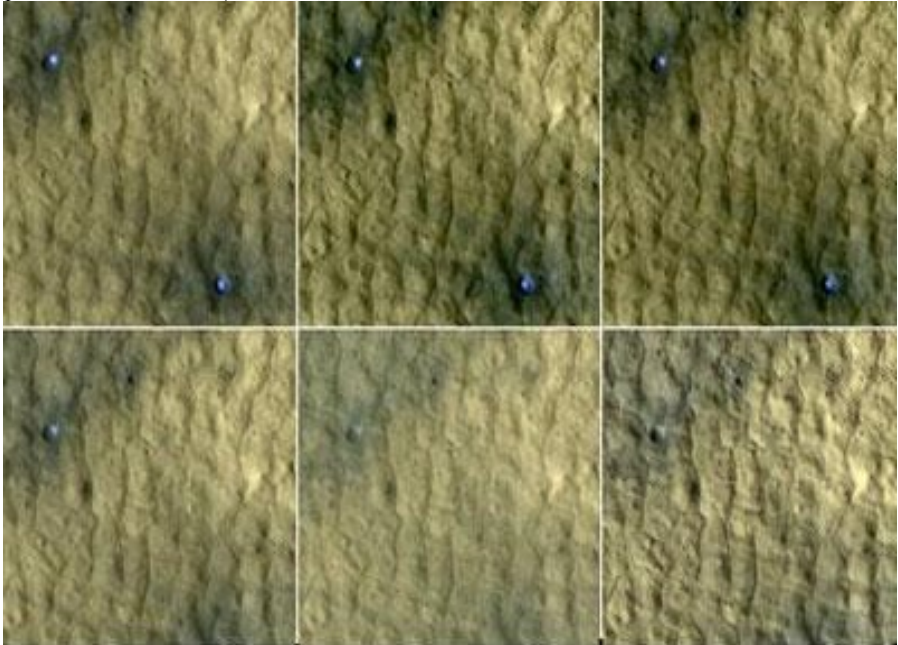


Рис. 13.2. Динаміка зміни видимості вибитого метеоритами льоду на поверхні Марса (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Світлі плями навколо всіх кратерів з часом зменшувалися в розмірах. Для упевненості, що це є саме водою, й отримувалися спектри відбитого від цих поверхонь світла в інфрачервоній ділянці. Спектри чітко вказали на присутність води якраз у голубих точках, показаних на Рис. 13.2. Швидкість випаровування цієї речовини також засвідчила, що це дуже чистий лід, який мінімум на 99% складається з води.

Отримані прямі знімки поверхні Марса з високою просторовою роздільною здатністю, також дозволили підтвердити наявність дуже чистого і яскравого льоду в кратерах (Рис. 13.3) з діаметром воронок від 4 до 12 м і глибиною від 0.4 до 2.5 м на п'яти різних майданчиках Марса. Вік цих ударних кратерів на момент початку спостережень – складав від кількох місяців до 4 років.

Розподіл викинутого ґрунту і світлих плям усередині і навколо кратерів – показує, що верхня межа крижаного шару у місця падіння метеороїдів лежить на глибині від 10 до 35 см, а товщина його залягання складала від декількох сантиметрів до метрів і, можливо, більше. Отже, зображення кратерів, отримані з камерою «HIRISE», вперше надали докази наявності льоду на поверхні Марса на півдорозі між північним полюсом і екватором.

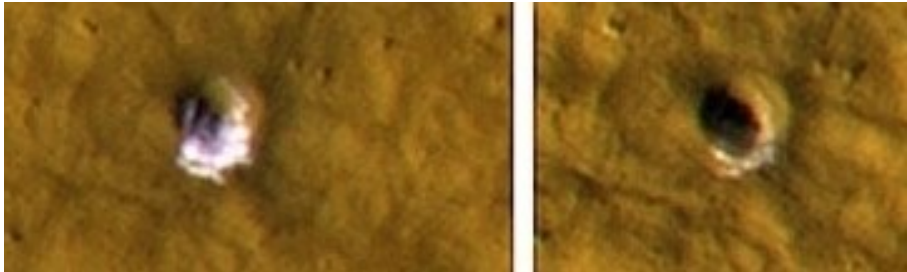


Рис. 13.3. Зображення кратера отримані 18.10.2008 (ліворуч) і 14.01.2009 (праворуч) за допомогою камери «HIRISE» з апарата «Mars Reconnaissance Orbiter» (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Порівняльний аналіз зображень майже 98% марсіанської поверхні, отриманих в 1999 р., та повторно у 2006 р. – на 30% поверхні планети виявив два десятки нових кратерів з діаметрами від 2 до 148 м. Вони є дуже важливими для визначення віку різних геологічних утворень на поверхні Марса. Сильні вітри і пилові бурі спричиняють ерозію деталей на поверхні та появу еолових відкладень і дюн [62, 64].

Наприклад, аналіз отриманих космічним апаратом «Марінер-9» протягом 4-х місяців зображень південного приполярного району, за характером ерозії дозволив виділити там три основні геологічні структури: найдревніша кратерована місцевість, вкрита котлоподібними западинами, плато віком близько мільярда років та наймолодші ділянки шаруватої структури віком у кілька мільйонів років, чи навіть менше. Вік перших двох типів місцевості є достатнім навіть для підтримання там деяких життєвих форм [53, 85, 86, 111, 115, 117, 121, 122].

Пізніше виявилось, що ерозія кратерів цього району практично не виділяється на фоні всієї поверхні [109, 123, 126]. Зараз знайдено багато зовсім «свіжих» ударних кратерів, які утворюються після падіння метеоритних тіл [126]. Світлі плями навколо них з часом зменшувалися в розмірах (Рис. 13.4).

А їхні інфрачервоні спектри чітко вказали на присутність там замерзлої води. Наприклад, на зроблених камерою «HIRISE» фото поверхні навколо рівнин Аркадія та Утопія, розташованих у північній півкулі планети, тільки протягом одного року вдалось

zareestrovati 9 desyatkiv zovsim «svizhix» krateriv iz rozmirom vid 1 do 15 metriv ta glubиною do 2.5 m.

Vykidi z nih pidtverdili prisutnist' dosit' chistogo ta yaskravogo vodnyago lyodu (Ris. 13.4). Vsyogo liشه cherez kil'ka misyachiv цей lid vyparuvavся.

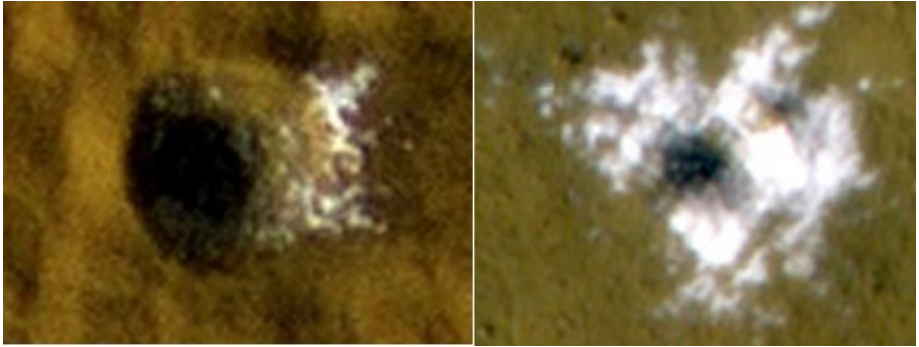


Рис. 13.4. Ліворуч – зображення кратера діаметром близько 12 м, утвореного між 03.07.2004 і 28.06.2008 на середніх широтах. Праворуч – ще один «свіжий» кратер, знайдено у вересні 2009 р. практично на екваторі, він має діаметр близько 8 м (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Rozpodil vykinutogo materialu navkolo vsix цих krateriv pokazav, sho verhnya meza kryzhanogo шару у місцях падіння метеорних тіл знаходиться на глибині понад 10 см. Раніше вважалось, шо лід накопичувався під поверхнею планети між окремими частинками ґрунту. Тобто, пропонувалося, шо це є сумішшю гязі й льоду у відношенні 50:50. Але ретельні дослідження прямих зображень і аналіз відповідних спектральних даних – дозволили з'ясувати, шо насправді викинутий із ударних кратерів білий матеріал складається лише з 1% гязі і з 99% водяного льоду.

Така чистота льоду поки шо незрозуміла. а підрахунками, для того щоб пояснити появу льоду на тих широтах, де він спостерігається, вологість марсіанської атмосфери на момент утворення льодового шару повинна була б бути у півтора рази вищою, ніж зараз. При цьому мова не йде про те далеке «вологе минуле», яке існувало на Марсі мільярди років тому. Тобто, отримані зображення цих «свіжих» ударних кратерів прямо доказали присутність чистого водяного льоду на поверхні Марса спочатку на половині відстані [22] між північним полюсом і екватором, а потім – навіть на екваторі.

14. Особливості марсіанської гідрології.

Сучасний Марс дуже схожий на пустелю. Незважаючи на це, для планети характерний досить складний гідрологічний цикл. На зображеннях з великої відстані добре видно північну та південну полярні шапки; коли планета проходить поблизу афелію, то можна побачити глобальну систему хмар [111]. Згідно з деякими кількісними оцінками, смінь північної полярної шапки становить до 1.2 млн км³ льоду. Це майже 4% від запасів води в антарктичному льодовику на Землі.

Запаси води в атмосфері Марса – є дуже малими [91]. Вдень температура марсіанської атмосфери біля поверхні лише інколи досягає 300 К; а вночі стає нижчою 170 К. За таких холодних умов, утримати в атмосфері помітну кількість водяної пари неможливо. Якщо всю водяну пару, що міститься в марсіанському повітрі, сконденсувати, то вийде півка товщиною у декілька десятків мікрон.

Ще пару мікрон сконденсованої води міститься в хмарах. Але навіть за таких умов у слабкій атмосфері Марса кругообіг води є можливим.

За основними кліматичними параметрами Марс – це найближча до Землі планета Сонячної системи [111]. Тому на цьому природному полігоні можна відпрацьовувати подібну до земної кліматичну систему. Це дозволить глибше зрозуміти особливості земного клімату.

Зараз на порядку денному стоїть проблема пілотованих космічних місій. Тому практично всі космічні апарати переслідують мету вибору місць для висадки людини. При цьому, немаловажним є відповідний рельєф, мінералогічний склад ґрунту [100 та пошуки запасів води [49].

Вперше, ідея вкритих тонким шаром пилу басейнів водяного льоду була висловлена в середині 20-го століття. За оцінками, товщина вічної мерзлоти могла сягати 0.5-1 км в екваторіальних районах та до 6 км – у полярних.

Дещо пізніше також обґрунтовувались механізми появи покритих пиловим шаром відкладень льоду. Одним з них є те, що під час глобальних пилових бур в атмосферу піднімаються мільярди тон пилу, який переноситься вітровими потоками на великі відстані [63]. Пил, котрий осідає з атмосфери [64, 79, 111], захвачується сезонним льодом з вуглекислого газу і/або води та акумулюється в шарі відкладень. На користь такого механізму слугує спостережна регулярність шаруватості у приполярних районах.

Вона може свідчити про періодичні зміни в їх утворенні та відображати кліматичні зміни, котрі зумовлені ексцентриситетом марсіанської орбіти [85, 146].

Допускали, що кожного наступного марсіанського року за рахунок літнього випаровування тонкого покрову з вуглекислого газу, могли відкриватися постійно існуючі шари замерзлої води.

Можливість появи льодових шарів під поверхнею планети базувалася на думці, що в минулому на Марсі міг бути значно більший атмосферний тиск, а на поверхні планети мала існувати вода в рідкому стані [117].

Питання про те, куди поділася марсіанська вода, виникало ще в докосмічну епоху. Тоді потужність запасів води у північній полярній шапці оцінювали на основі наземних інфрачервоних спостережень. Адже, якщо Марс формувався в умовах, близьких до умов формування інших планет земної групи, з одного й того ж газо-пилового диску, то й кількість летких елементів (у тому числі води) на Марсі та інших планетах земної групи, має бути приблизно однаковою [100, 111, 138].

Більше того, Марс, як планета, близька за розміщенням до планет-гігантів, мав би бути навіть дещо збагаченим леткими елементами порівняно із Землею. Адже зона початкового формування Землі була теплішою від марсіанської зони.

Такі ж міркування приводять до висновку, що і та частина гідросфери, котра була привнесена при ударах кометних тіл на стадії інтенсивного бомбардування, для Марса мала б бути такою ж потужною, як і для Землі. Відомі тепер механізми втрати летких елементів (наприклад, вибуховий парниковий ефект, що, ймовірно, привів до практично повної втрати води Венерою) вимагають великих потоків сонячного випромінювання. А тому на Марсі такий сценарій не міг би реалізуватися.

Ще більше питань виникло після аналізу зображень марсіанської поверхні, отриманих космічними апаратами «Марінер-9», «Вікінг-1, -2» в 1970-х рр. На рельєфі планети виявили багато каньйонів, схожих на висохлі русла річок.

А в гирлах великих рівнин знайшли структури осадового походження, аналогічні шельфам морів та дельтам річок (Рис. 14.1). Такі зображення породили гіпотезу про те, що близько 3.5 млрд років тому на Марсі було тепло і волого, він мав щільну атмосферу, по поверхні текли річки та існували моря [138].

Така гіпотеза «теплого вологого раннього Марса» [85] вимагала пояснення: а що ж відбулося згодом, яка кліматична катастрофа спіткала планету, перетворивши її на холодну, практично безводну й безповітряну пустелю? Можна було пов'язати процеси дисипації води й вуглекислого газу, як основної складової атмосфери планети.

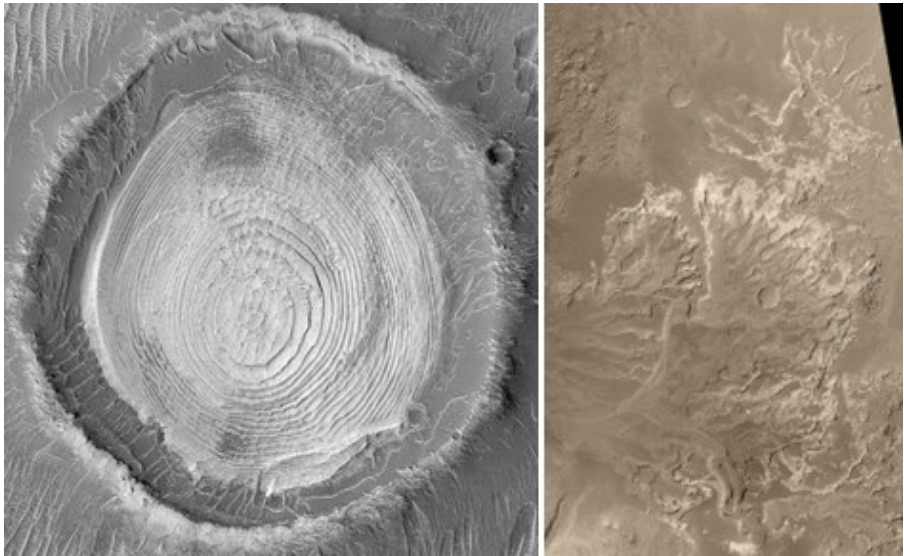


Рис. 14.1. Структури осадового походження (ліворуч) і можлива дельта річки на Марсі (праворуч) (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Зараз атмосферний тиск на Марсі часто буває близький до потрібної точки води. Припустивши, що поки тиск перевищував це значення, в атмосфері діяв один з відомих у геохімії циклів: карбонатно-силікатний, достатньо активний і на Землі.

Він полягає в тому, що вуглекислий газ розчиняється в краплинах хмар, а потім осідає, переноситься у ґрунт і там бере участь у певних реакціях. Це зумовлює відкладення карбонатів в осадових породах. А в результаті тектонічних процесів, карбонати потім можуть дрейфувати до мантії, де при температурах близьких до 900 К,

вони розкладаються. Вуглекислий газ, що вивільняється при цьому, знову потрапляє назад в атмосферу із вулканічними викидами [126].

Але така гіпотеза має ряд труднощів. Зокрема, якщо карбонати накопичувалися протягом такого тривалого часу, акумулюючись і в атмосфері, і в гідросфері, то вони і тепер мали б бути в марсіанських породах. Проте дистанційними спостереженнями таких карбонатів виявити на Марсі поки що не вдалося.

Відмітимо, що деякі марсіанські русла бувають досить глибокими та прямими для того, щоб бути руслами річок у звичному розумінні. Наприклад, глибина долини Ніргал – майже 1 км. Хоч вона й має певний нахил від витoku до гирла, та рівнинні річки на Землі є значно більш звивистішими.

Решта долин за своїми кількісними характеристиками також істотно відрізняється від земних річок. Але подібні русла є досить схожими на долини у земних льодовиках.

Тому цілком можливо, що саме льодовики є відповідальними за формування мережі каньйонів на Марсі [128]. До того ж, знайдений у марсіанських породах такий мінерал, як гематит [117] свідчить про гідротермальну активність на планеті. Причому, вона могла відбуватися у відносно недавню історичну епоху.

Наявність такого мінералу може вказувати на те, що у товщі вічної мерзлоти на Марсі є умови для утворення досить великих (товщиною 30-100 м і діаметром до десятка кілометрів) лінз рідкої води, які можуть підігріватися локальною тектонікою. У певних випадках окрема лінза може не тільки перегрітися, а навіть закипіти. Тоді витіснення води масою понад 10^9 тон на поверхню приведе до формування потужного селевого потоку, який і може створити глибокий каньйон.

Істотним є те, що в такому випадку протікатиме вже не рідка вода, а суміш грязі, льоду й пари. Причому витікатиме все це – лише епізодично. Наскільки таким механізмом можна буде пояснити реальний марсіанський рельєф, можуть показати докладні чисельні розрахунки. Пошук води на Марсі визнаний одним з найважливіших завдань усіх марсіанських експедицій.

Виявлення водних джерел на планеті мало б величезне значення для астробіології [96, 113]. Адже здатність Марса підтримувати життя – подало б підтримку тим ентузіастам, котрі закликають всерйоз задуматися над космічною експансією [79, 105, 124].

Якщо досяжні джерела води дійсно є на Марсі, то здійснити подібні програми буде значно простіше. Відзначимо, що сучасна марсіанська гідрологія – це не тільки палеоклімат і вічна мерзлота. Адже сучасний цикл марсіанської води охоплює близько 10^8 тон водяної пари в атмосфері; а також хмари, які добре помітні у вигляді світлого туману на зображеннях, отримуваних різними інструментами.

До того ж, слід додати сезонні полярні шапки та вранішні тумани, що залишають на поверхні планети мікроскопічний шар інію. І нарешті – це «випаровування» реголіту та роздробленого метеоритами за мільярди років глинистого ґрунту, який має хороші абсорбційні властивості.

Незважаючи на відносно невеликий об'єм атмосферних запасів води, саме атмосферні процеси відіграють визначальну роль у підтримці сучасного стану поверхневих резервуарів марсіанської води. Дослідження показали, що в північній півкулі води майже на порядок більше, ніж у південній.

Щодо можливих причин появи асиметрії між півкулями запасів марсіанської води біля поверхні, існують такі точки зору. По-перше, геологічні властивості північної та південної півкуль помітно розрізняються. Поверхня північної півкулі залягає в середньому на кілька кілометрів нижче від південної, у якій лише на дні найглибшої западини – Хеллас – геопотенціал приблизно такий, як на північному полюсі.

Крім того, північна півкуля світліша, оскільки там є більше осадових глинистих порід і менше давніх базальтів. Як відомо, глина здатна абсорбувати значні кількості води. Тому, якщо глобальне переміщення води в атмосфері відіграє невелику роль у порівнянні з локальним обміном, то нерівномірний її розподіл між півкулями можна було б пояснити різною здатністю порід на поверхні планети утримувати над нею певну кількість пари.

У цьому випадку можна було б чекати, що такий несиметричний розподіл води є дуже давнім. Принаймні – він не є молодшим від більшості теперішніх осадових порід. Тобто, йому має бути близько мільярда років.

Згідно з іншою гіпотезою, причиною нерівномірного розподілу води – є асиметрія зміни сезонів [101, 112, 118] у двох півкулях, яка викликана помітним ексцентриситетом ($\epsilon \approx 0.09$) орбіти Марса. За таких умов модуляція сонячного потоку між афелієм і перигелієм досягає 40%.

Тому літо у північній півкулі є довшим і холоднішим, ніж у південній. Нижча, ніж в перигелії температура, зумовлює конденсацію водяної пари в атмосфері на відносно невеликих висотах (нижче 10 км). Тобто там, де домінують направлені до екватора повітряні потоки глобального конвективного переносу.

На Землі подібний перенос існує лише у тропічних широтах та є причиною виникнення пасатних вітрів. Вище за рівень конденсації вода не проникає через швидке гравітаційне осідання мікронних кристалів льоду. Цей ефект приводить, зокрема, до утворення в афелії тропічного поясу хмар, який замикає випарувану полярною шапкою воду в північній півкулі.

Водночас, при перебуванні планети в перигелії (в значно тепліший період) хмари слабо впливають на можливість переносу між півкулями. По цій причині вода, яка сублімує із південної полярної шапки, більш рівномірно переміщується. Тому, за порівняно короткий проміжок часу такий своєрідний сезонний «насос» міг би перекачати всю воду до тієї півкулі, в якій літо співпадає з проходженням Марса афелію орбіти.

Згідно ще деяким припущенням, відкладення водяного льоду циклічно розподілялися між північним і південним полюсами Марса протягом останніх 21000 років. Цей часовий проміжок був розрахований по коливаннях осі обертання планети (прецесії). Результати моделювання показали, що протягом такого часу вода на північному полюсі планети перебувала в нестабільних умовах і могла легко переміститися на південний полюс у формі пари, і знову сконденсуватися там на поверхні.

Таким чином, на південному полюсі за рік накопичувався шар водяного льоду товщиною до 1 мм. Тоді за 10000 років це привело б до утворення шару водяного льоду товщиною до 6 м. Приблизно 10000 років тому цикл прецесії планети змінився і почалося її повернення до існуючої зараз конфігурації.

В той час водяний лід уже на південному полюсі перебував у нестабільному стані і вода почала переміщуватися на північ. Відповідно до спектральних даних [61, 91], близько 1000 років тому діоксид вуглецю почав намерзати на поверхні водяного льоду й, таким чином, блокувати переміщення води до іншого полюса.

Враховуючи, що нахил осі обертання планети міг багато разів змінюватися в циклах Міланковича з періодом приблизно 10^5 років, то можна вважати, що описана вище асиметрія є відносно молодою і, можливо, вона ще й змінюється на протилежну. Непрямою ознакою зміни властивостей півкуль у глобальному водному циклі, служать концентричні шаруваті відкладення у полярних шапках. Не виключено, що впродовж марсіанської історії шапки мінялися місцями.

Фактично, питання про відносний внесок обох механізмів у формування асиметричного розподілу води – це питання про відносну роль локального обміну й

глобального переносу. Однак, деякі дослідники схиляються до іншої гіпотези. Вони вважають, що інтенсивний локальний обмін є необхідною умовою стабілізації глобального циклу, відіграючи роль дисипативного чинника. Якби реголіт марсіанської поверхні не «дихав», то міграція води в бік екватора протягом сезону була б практично неможливою. Адже за таких умов вода вмиє захоплювалася б на межі відповідної полярної шапки у так званих «холодних пастках».

15. Порівняння «древньої» і сучасної гідрології Марса.

Можливість появи шарів льоду під поверхнею планети базується на думці, що в минулому на Марсі був значно більший атмосферний тиск, а на його поверхні існувала вода в рідкому стані [16, 49, 79, 126, 138]. До речі, ще за даними радіолокаційних спостережень в Голдстоні в 1971 та 1973 рр. у районі Solis Lacus на Марсі була виявлена аномальна за відбивною здатністю деталь, яка має надзвичайно високу гладкість. Вважається, що одним з можливих пояснень цього є допущення про наявність на глибині близько 1 м рідкої води.

Ретельні дослідження в останній час показали, що в північній півкулі зараз води майже на порядок більше, ніж у південній. У липні 2005 р. фахівці з Європейського космічного агентства повідомили, що на Марсі виявлено замерзлу воду навіть на відкритій поверхні планети. Присутність водяного льоду всередині кратерів поблизу північного полярного кола Марса, дає важливу інформацію про умови, які існували в минулому на поверхні Марса.

Дослідження в [27] показали, що утворення тріщин у марсіанських кратерах повинне бути пов'язане з поступовим випаровуванням води, що містилася там раніше. У цій роботі була використана інформація, передана станціями «Mars Global Surveyor» і «Mars Reconnaissance Orbiter».

Аналіз структури внутрішньої поверхні 266 ударних кратерів показав, що тріщини на їх дні багато разів перетиналися, утворюючи на поверхні окремі області з максимальними розмірами до 250 м. При цьому, середній розмір таких областей складав 70-140 м, а ширина тріщин у ґрунті змінювалася від 1 до 10 м.

Такі багатокутники (Рис. 15.1), оточені тріщинами з усіх боків, спостерігалися неодноразово, проте до даної роботи їх формування пов'язували із стисненням багаторічно-мерзлих марсіанських гірських порід [91, 144]. В [27] запропоновано аналітичну модель їх утворення, у якій показано, що за існуючих на Марсі умов при тепловому стисненні порід зможуть формуватися тільки багатокутники, діаметр яких не перевищує 65 м.

Причому глибина спостережуваних тріщин і розміри багатокутників повністю відповідали дії процесу випаровування води, який, наприклад, викликає розтріскування дна висохлого озера на Землі.

Отриманий результат також дає підстави говорити про те, що в далекому минулому, на поверхні Марса було доволі багато води, яка могла збиратися в низинах і в кратерах. Ретельні дослідження багатьох кратерів [124] дозволили зробити припущення, що формування тріщин у деяких кратерах північної півкулі Марса завершилося набагато пізніше.

За таких умов лід, що знаходиться під поверхнею планети, може розтанути, наприклад, при падінні метеорита, чи під дією вулканічної діяльності [118, 145]. І це може привести навіть до утворення озера з рідкої води, покритого товстим шаром замерзлого льоду.

Розрахунки показують, що зараз весь Марс скутий вічною мерзлотою, товщина якої на екваторі досягає одного, а до полюсів збільшується до кількох кілометрів. Проте виразні яри-промоїни усередині деяких крупних кратерів говорять про періодичний вихід рідкої води з розтанувшого шару вічної мерзлоти.

Зміни зовнішності деяких ярів, можуть бути утворені або рідкою водою, або ж слідами осипання сухого, чи мокрого ґрунту по крутому схилу. На користь сезонних [96, 97, 105, 109, 113] виходів води аргументів значно більше. Але це могла бути лише епізодична поява рідини на марсіанській поверхні.

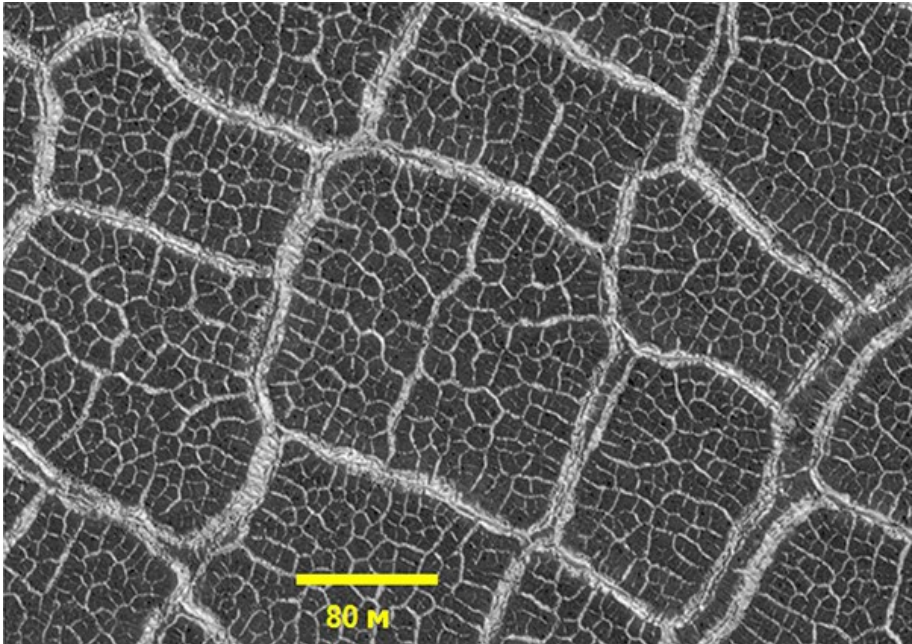


Рис. 15.1. Крупні багатокутники на дні одного з кратерів; розмір центрального – складає 160 м, а ширина тріщин змінюється від 5 до 10 м (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

В цілому ця планета залишається скутою вічною мерзлотою, в якій і прихована вся вода, що колись заповнювала нині сухі русла річок, каналів і западини багатьох кратерів (Рис. 15.2).

Дані, отримані з орбітального апарату «Mars Reconnaissance Orbiter», показують, що лід на планеті знаходиться не тільки на полюсах, але і в районах, розташованих поблизу екватора. І якщо полярний лід ще можна пояснити особливостями сучасного клімату Марса, то наявність льоду близько від екватору – це дуже вагомий доказ на користь значної кількості води на Марсі [101, 110, 120, 146].

Причому останні знахідки говорять, що вода на планеті була або зовсім недавно [12, 100], або залишається там порівняно неглибоко і зараз.

Дослідження в 2005 р. верхніх шарів планети за допомогою радара «Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionospheric Sounding» («MARSIS») на глибинах до декількох кілометрів також виявили, що під поверхнею Марса є велика кількість води в замороженому стані [11, 33]. Найбільші скупчення льоду зафіксовано в полярних областях і в кратері, розміщеному в середніх північних широтах у районі Chryse Planitia. Наявність льоду з води у ґрунті біля екватора можна добре пояснити надто низькою теплопровідністю складових ґрунту; адже протягом доби прогрівання від Сонця сягає дуже невеликої глибини.

Деяка кількість рідкої води може спостерігатися тимчасово на поверхні Марса і сьогодні. Але вона обмежується слідами випавшої вологи з атмосфери та деяких тонких плівок, які є складними середовищами для можливого життя [85, 111, 115-117]. На поверхні планети зараз немає великих водойм у рідкому стані, тому що атмосферний тиск там становить у середньому лише 610 паскалів; це трохи нижче тиску пари води в її

потрійній точці; за середніх марсіанських умов вода, що нагрівається на марсіанській поверхні, сублимувала б; тобто прямо перейшла б із твердого стану в пару; навпаки, при охолодженні, водяна пара осідає і безпосередньо переходить і стан твердої речовини.

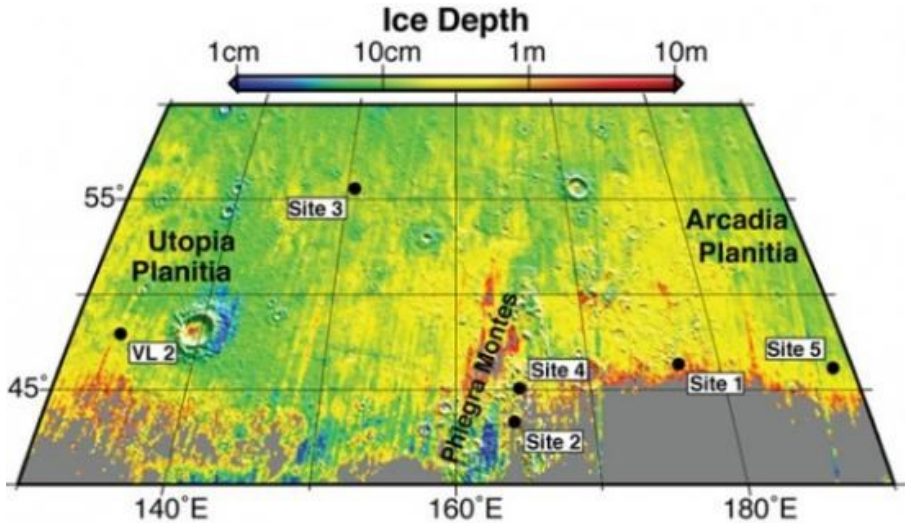


Рис. 15.2. Свідчення льоду у невеликих кратерах на поверхні Марса у середніх широтах (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Приблизно 3.8 млрд років тому Марс міг мати щільнішу атмосферу та вищу температуру поверхні [98, 128, 129]. Це дозволяло перебувати величезній кількості рідкої води на поверхні планети; можливо, включаючи океан великого розміру, що міг покривати до третини планети. Вода також могла текти поверхнею протягом коротких періодів часу в різні часові проміжки протягом останніх років історії Марса. Наприклад, Еоліс Палюс у кратері Гейл, досліджений марсоходом «Curiosity». Цей кратер є геологічними залишками стародавнього прісноводного озера, яке могло бути гостинним середовищем для життя мікробів.

Сучасні запаси води на Марсі можна оцінити на основі зображень із орбітальних апаратів, при використанні методів дистанційного зондування (спектроскопічних вимірювань [761, 62, 64, 132], радарів тощо), а також із досліджень поверхні планети з посадочних апаратів і марсоходів [100]. Геологічні докази наявності в минулому води на поверхні включають прорізаних повенями величезні канали, стародавні мережі річкових долин, дельти річок та дно озер [127]. Також на поверхні Марса виявлено ряд гірських порід і мінералів, які могли утворитися лише в рідкій воді. Численні геоморфологічні особливості також свідчать про наявність ґрунтового льоду (вічної мерзлоти) і про рух льоду в льодовиках, як у порівняно недавньому минулому, так і прямо зараз. Яри та лінії схилів уздовж скель і стін багатьох кратерів свідчать про те, що текуча вода продовжує формувати сучасну поверхню Марса, хоча й у набагато меншому ступені, ніж у давньому минулому.

Незважаючи на те, що поверхня Марса періодично була вологою і могла бути гостинною для мікробного життя мільярди років тому, нинішнє середовище на поверхні є сухим і прохолодним. І це є непереборною перешкодою для існування живих організмів.

Крім того, на Марсі немає густої атмосфери, озонового шару та потужного магнітного поля.

Такі особливості дозволяють сонячному та космічному випромінюванню безперешкодно потрапляти на поверхню. Шкідливий вплив іонізуючого випромінювання на клітинну структуру є ще одним із основних факторів, що обмежують виживання життєвих форм на поверхні планети. Таким чином, найкращими потенційними місцями для виявлення життя на Марсі можуть бути лише підземні середовища, де знайдено велику кількість водяного льоду.

Загальновизнано, що Марс мав велику кількість води на початку своєї історії. Але всі великі області рідкої води з тих пір зникли з поверхні планети. Значна частина цієї води зберігається на сучасному Марсі у вигляді льоду, а також замкнена в структурі багатих водою матеріалів. До них належать глинисті мінерали (філосилікати) та сульфати. Дослідження ізотопного співвідношення водню вказують на те, що астероїди і комети, розташовані за межами 2.5 АО, також є джерелом марсіанської води.

Вважають, що навіть зараз її кількість наразі становить від 5% до 30% від запасів у нинішньому океані Землі.

16. Замерзлі водойми Марса.

Влітку 2000 р. станція «Марс глобал сурвєєр» виявила на поверхні планети геологічні структури [60, 62], які могли виникнути тільки під впливом могутніх потоків води. А на початку осені того ж року на переданих з Марса фотознімках гірських масивів планети було, можливо, зафіксовано величезну крижану водойму [16], під льодом якої може бути й вода (Рис. 16.1).

Такий висновок тоді дозволив припустити те, що вік ряду промоїн на досить крутих схилах гір був лише 1-2 роки.

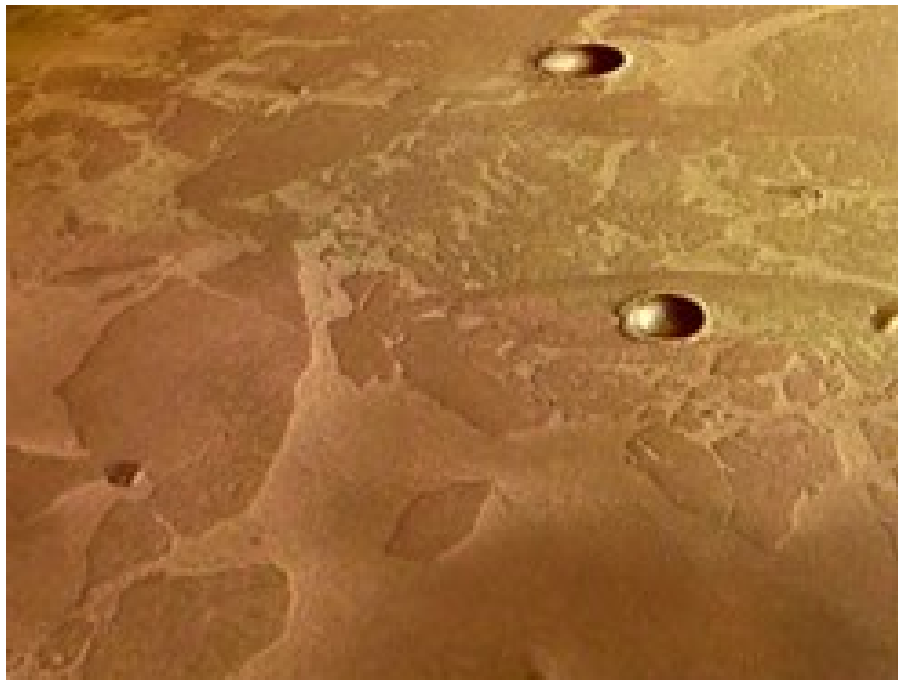


Рис. 16.1. Можлива замерзла водойма на Марсі поблизу (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

А недавно було повідомлено про виявлення прихованого під поверхнею Марса можливого величезного моря із замороженої води [78]. Знайдений шар ґрунту майже на 80% складається з водяного льоду, а також із замерзлого CO_2 та піску [13, 91]. Він розташований під поверхнею на заході рівнини Утопія, приблизно на середніх широтах у північній півкулі.

Виявити це заморожене море вдалося за допомогою радіолокатора «SHARAD» орбітальної станції «Mars Reconnaissance Orbiter». Розрахунки показали, що дана заморожена водойма має товщину льоду від 80 до 170 м з об'ємом понад 14 тисяч кубічних кілометрів. Марсохід «Spirit» досліджував виступи твердих гірських порід біля підніжжя Колумбійських гір.

Ці породи, можливо, є найстарішими зі всіх, які марсоходи досліджували за час своєї місії. У жовтні 2004 р. марсохід «Opportunity» виявив нові можливі ознаки слідів

води на Марсі. Відкриття незвичайної скелі «Escher» (Рис. 16.2, ліворуч), було зроблене випадково при намаганні обійти ділянки з пісками у кратері Ендюренс.

Характер тріщин на цій скелі дозволив заявити, що дана порода піддавалася тривалій дії рідини. Але тоді вважали, що, можливо на Марсі був не водяний, а якогось іншого роду лід. Про те, що вода могла перебувати на поверхні Марса тривалий період часу [96, 101, 107, 112, 129, 146] свідчать і багато інших зображень, зроблених марсоходом «Opportunity».

Так, спустившись 22.07.2004 у кратер Ендюренс, лендер виявив ще й смугу тонких темних пластин. Вони були розташовані на краю одного з виступів основної підстилаючої породи (Рис. 16.2, праворуч).



Рис. 16.2. Ліворуч – на зображенні з марсохода «Opportunity» показана скеля «Escher» з тріщинами, що вказують на тривалу дію води; праворуч – зображення тонких темних вертикальних пластин на краю виступу основної породи (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Було висловлене припущення, що цей виступ є шаром породи, яка утворилася тоді, коли старіші шари каменю розтріскалися, а багата мінералами вода почала просочуватися крізь ці тріщини. З часом, там залишилися лише мінеральні відкладення. І вже з них утворилася порода, значно міцніша від навколишнього каміння. Саме тому при ерозії основної породи вертикальні пластини змогли залишитися.

На цьому ж багатошаровому камені також видно численні свідчення минулої присутності води. Серед них – є мінерали [144, 146], порожнини, що залишилися після розчинення солей, гематитові сферичні кульки і т. п.

Спостережні результати показали, що в кратері Ендюренс ці ознаки розповсюджуються на кілька геологічних шарів. Такого типу знахідка суттєво збільшує тривалість періоду присутності води на поверхні Марса.

Адже утворення таких тріщин вимагає обов'язкової присутності водяного середовища. Причому для того, щоб відкладення спресувалися в таку тверду речовину потрібен тривалий час. Поки складно сказати, скільки саме часу вода була на поверхні Марса. Але мабуть достатньо навіть для того, щоб там могло зародитися життя [85, 111, 117].

На марсоходах «Spirit» і «Opportunity» американської місії «Mars Exploration Rover» були встановлені Мессбауерівські спектрометри. Вони вперше дозволили отримати склад ґрунту по спектрах однієї з планет Сонячної системи при проведенні космічних [100] досліджень (Рис. 16.3, ліворуч). Ці спектри дозволили визначити склад з'єднань заліза на поверхні Марса. Вони показують наявність трьох різних залізистих порід. Одна з них, це мінерал олівін. Його існування говорить про те, що він не піддавався ерозії і дії води. Отримані результати також вказали на явну можливість існування води на поверхні цієї планети у минулому. Так, у 2003 р. на Марсі вперше було виявлено солі вугільної кислоти. Дані сполуки входять до складу багатьох земних мінералів. А утворюються карбонати лише за наявності води й вуглекислого газу.

Таким чином це відкриття підкріпило гіпотезу, згідно з якою в далекому минулому на Марсі [42] мали бути великі запаси води (Рис. 16.3, праворуч).

Із аналізу інформації, що поступала з марсоходів, вдалося знайти свідчення присутності вологого середовища ще й у камені «El Capitan» (Рис. 16.4, ліворуч). Там також були виявлені сульфати та мінерали (Рис. 16.4, праворуч), які могли сформуватися лише за присутності води.

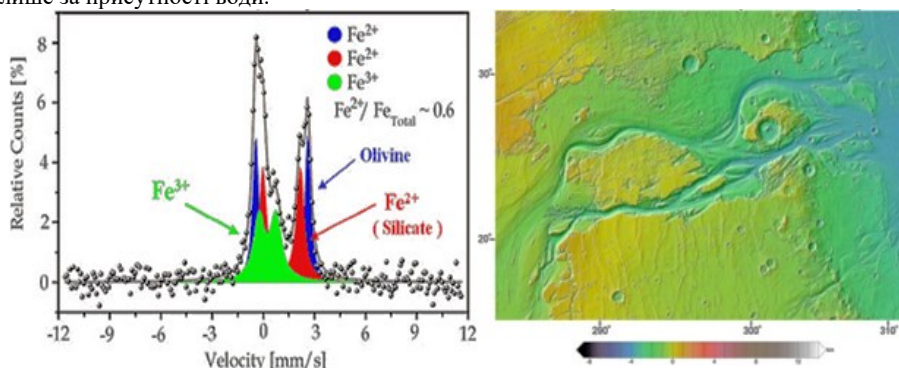


Рис. 16.3. Ліворуч – спектр мессбауерівського спектрометра на лендері «Spirit» в кратері Гусева (17.01.2004). Праворуч – топографічна карта каналу Kasei Valles ([https://en.wikipedia.org/wiki/File: Kasei_Valles_topo.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Kasei_Valles_topo.jpg)).

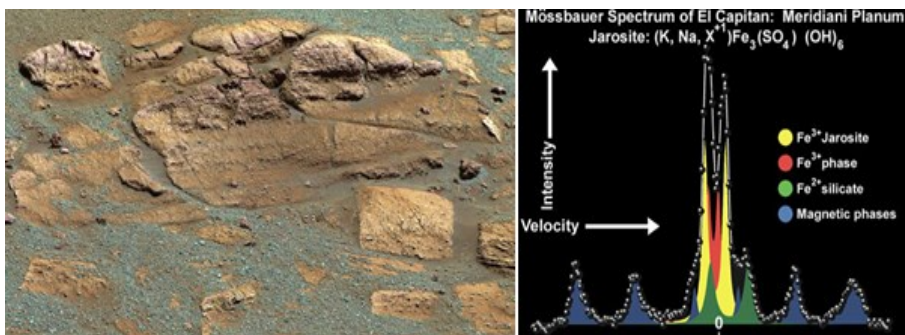


Рис. 16.4. Ліворуч – зображення з камери «Opportunity» показує область скелі «El Capitan» в долині Меридіан

(https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/00/PIA05457_modest.jpg).

Праворуч – мессбауерівський спектр дозволяє ототожити мінерал ярозит $(K, Na, X^+) \cdot Fe_3SO_4 \cdot (OH)_6$, що містить гідроксил, у камені «El Capitan» [66].

Пізніше схожу знахідку зробив марсохід «Spirit». Він просвердлив камінь «Humphrey» і зафіксував там наявність порожнеч, котрі могли утворитися тільки під впливом води. А в самих порожнечах виявилися відкладення мінералів, які можуть утворюватися тільки у присутності води. Всі ці знахідки дали змогу оголосити про те, що місії «Opportunity» і «Spirit» є успішними. Нові результати отримані також у результаті обробки спостережень зі спектрометром OMEGA, установленим на апараті «Марс Експрес».

За допомогою спектрів у видимому і ближньому інфрачервоному діапазонах на поверхні Марса вдалося виявити області, що містять філосилікати (водовмісні мінерали) і гідратовані сульфати (Рис. 16.5). Обидві ці групи мінералів виникають в результаті хімічних змін гірських порід, але розрізняються механізмом утворення. Філосилікати утворювалися із магматичних порід за тривалого контакту з водою.

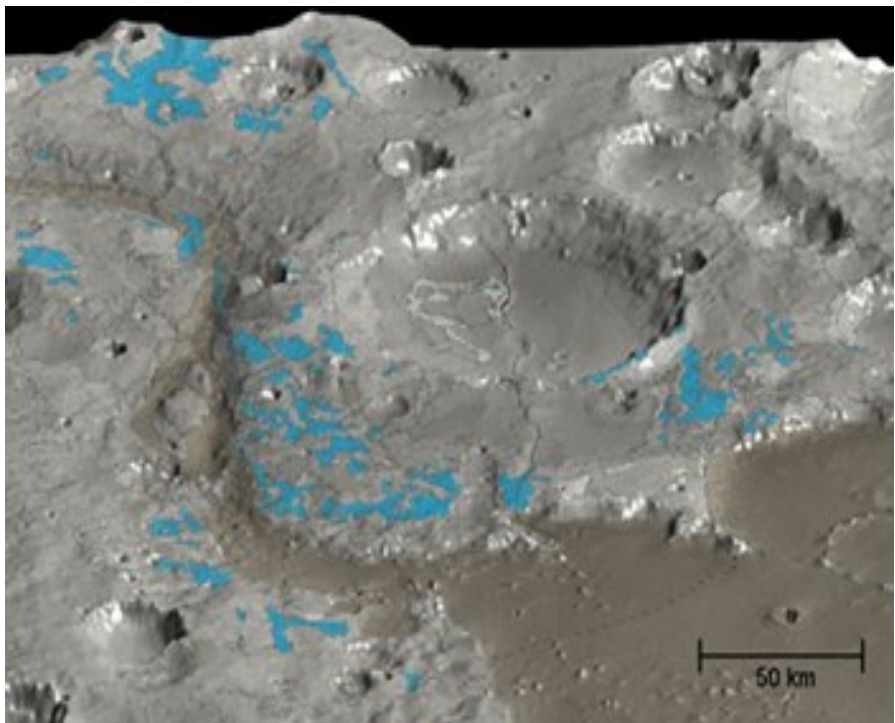


Рис. 16.5. Розташування філосилікатів і гідратованих сульфатів по отриманих спектрометром «OMEGA» даних (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Гідратовані сульфати також утворюються під впливом води. Причому така дія не має бути обов'язково досить тривалою. Але необхідно, щоб вода мала високу кислотність. Виявлення таких мінералів ясно говорить про те, що у минулому вода була присутньою на поверхні Марса. Проте визначити, коли саме це було, значно важче. Об'єднавши всю наявну інформацію та отримані спектрометрами «OMEGA» дані, було запропоновано наступний можливий сценарій появи цих мінералів.

Багаті філосилікатами відкладення утворилися на Марсі в давній геологічний період, що закінчився 3.8-3.5 млрд років тому. Даний висновок зроблено на підставі

підрахунку кількості метеоритних кратерів і оцінки ступеня їх ерозії. Передбачається, що ті далекі часи на Марсі було досить багато води, й вона цілком могла бути присутня на поверхні планети у рідкому вигляді. Згодом, змінені водою породи, були покриті лавовими полями.

У наш час ерозія лише в деяких місцях оголила стародавні породи, що містять філосилікати. Дана гіпотеза пояснює той факт, чому ділянки, на яких виявлено філосилікати, не є пов'язаними із сухими руслами та іншими слідами присутності води на марсіанській поверхні.

Тобто, подібні русла могли утворитися пізніше. Вода в них була присутня відносно недовго і не могла привести до утворення філосилікатів. Зате в пізнішу епоху – цілком могли утворитися гідратовані сульфати.

Це могло відбутися тоді, коли клімат на Марсі помітно змінився, кількість води зменшилася і вона стала кислшою. Oceanus Borealis – є тим гіпотетичним океаном, що, можливо, існував на поверхні Марса у далекому минулому. Згідно з моделями, марсіанський полярний океан був частково покритий кригою та мав температуру води, близьку до точки її замерзання. Це заважало формуванню глини, яка на Землі є важливою ознакою водою.

Зображення на Рис. 16.6 охоплює поверхню Марса на північ від широти 65°. Воно включає північну полярну крижану шапку приблизно 1100 км у поперечнику. «Марінер-9» у 1972 р. виявив смугу піщаних дюн, що оточують полярні льодовикові відкладення, протяжність якої в деяких місцях становить 500 км. Вся крижана шапка оточена великими рівнинами Planum Boreum і Vastitas Borealis.

Недалеко від полюса є велика долина, Chasma Boreale, яка, можливо, утворилася в результаті танення води з крижаної шапки. Альтернативна точка зору полягає в тому, що його створили вітри, що надходять з полюса холоду. Іншою помітною особливістю є плавний підйом, який називався Olympia Planitia.

В сезон літа стає помітним темний «комір» навколо залишкової шапки; це в основному викликано дюнами. На Рис. 16.6 показано й кілька дуже великих кратерів (Lomonosov and Korolev) та менший кратер Стокса на гладкій поверхні з невеликими змінами рельєфу [2, 119, 123].

Посадковий модуль «Phoenix» приземлився 25.05.2008 на Vastitas Borealis and Mare Boreum. Зонд зібрав і проаналізував зразки ґрунту, намагаючись виявити воду та визначити, наскільки гостинною планета колись була для можливого розвитку життя. Він залишався активним, доки зимові умови не стали надто суворими майже через 5 місяців. Після завершення місії було повідомлено, що у проаналізованих зразках були виявлені хлорид, бікарбонат, магній, натрій, калій, кальцій і, можливо, сульфат. Їх рН було близьким до 7.7.

Також було виявлено перхлорат (ClO₄), дуже сильний окислювач при підвищених температурах [41]. Це стало важливим відкриттям, оскільки дана хімічна речовина може використовуватися для ракетного палива та як джерело кисню для майбутніх колоністів. Крім того, за певних умов перхлорат може перешкоджати розвитку життя. Хоча деякі мікроорганізми можуть отримувати енергію з речовини шляхом анаеробного відновлення.

А будучи змішаною з водою, ця хімічна речовина може значно знизити температуру її замерзання. Таким чином, було знайдено багато прямих доказів наявності води в цьому місці. А перхлорат, можливо, навіть дозволяє і сьогодні утворювати невелику кількість рідкої води на Марсі. Яри є поширеними в деяких районах Марса, і могли утворитися внаслідок сезонного [70, 97, 105, 113] танення перхлоратового льоду та спричинити розмивання ґрунту на крутих схилах водою [33, 44, 118].

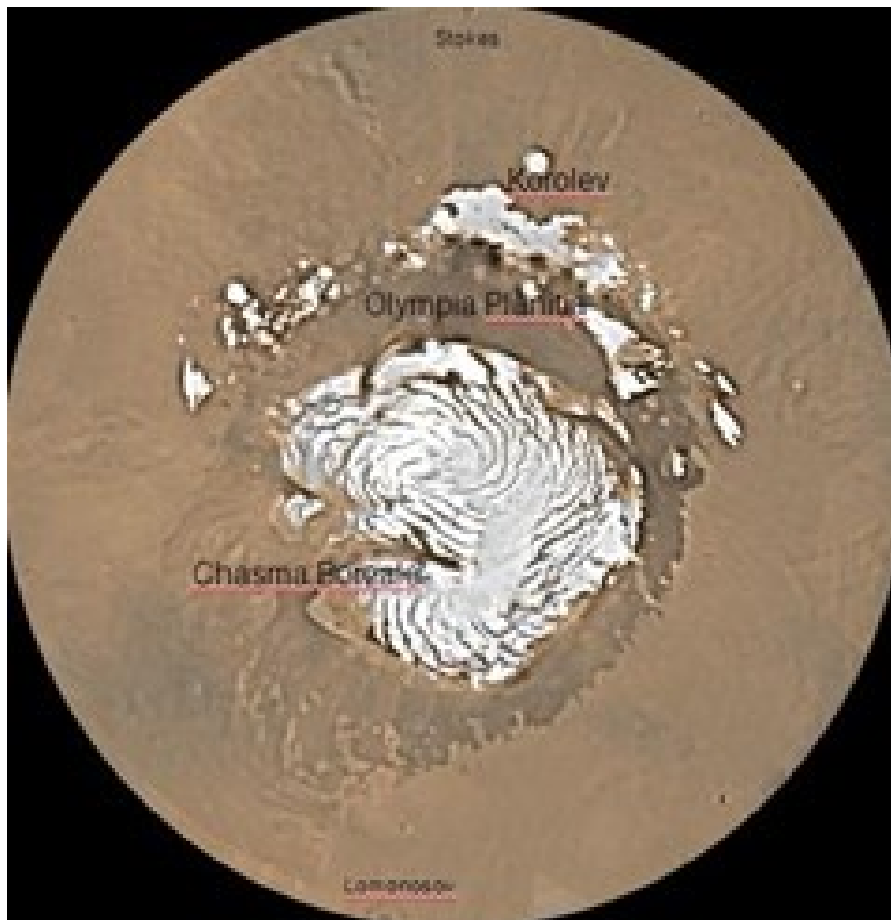


Рис. 16.6. Карта Північної полярної області
(https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e9/Mare_Boreum_Map.jpg).

17. Заморжені резервуари води під поверхнею Марса.

На початку XXI століття з допомогою орбітальних станцій на поверхні Марса виявили геологічні структури, які могли виникнути лише під впливом потужних потоків води. Трохи пізніше на фотознімках гірських масивів планети була зафіксована ще й величезна крижана водойма [85, 91] з можливою рідкою водою під її льодом. А ще через деякий час повідомили про знаходження під поверхнею рівнини Утопія можливого величезного моря (Рис. 16.1) із замороженою водою [78, 126].

Його верхній шар складається із водяного льоду, із замерзлого CO₂ та з піщано-пилової суміші [16, 17, 24, 33, 64].

Ще через пару років апаратурою марсоходу «Opportunity» було виявлено нові ознаки слідів води [2, 41, 100]. Причому, ці ознаки розповсюджуються на кілька геологічних шарів. Це значно збільшує тривалість періоду присутності води на поверхні Марса [101, 137, 138]. Можливо, навіть достатньо для того, щоб там могло зародитися життя [115, 117, 118].

Тоді ж вдалося вперше виявити солі вугільної кислоти. А утворюються карбонати лише за наявності води й вуглекислого газу. Їхнє відкриття підкріпило гіпотезу, згідно з якою в далекому минулому на Марсі [126, 129, 146] були великі запаси води.

Температура замерзання води знижується внаслідок тиску товщі льоду у 1.5 км, а також через мінеральні солі [2, 14, 60, 144], які у ній розчинені. Адже відомо, що солі натрію, магнію і кальцію, які відкрили на Марсі, можуть зменшити температуру замерзання води аж до -74°C. До речі, одне з найсолоніших озер на Землі – озеро Дон Жуан в Антарктиді – не замерзає навіть при температурі -50°C. Отже, ніщо не суперечить можливості існування таких солоних водойм і на Марсі [43, 62, 132]. Можливо, під полярними шапками цієї планети існують й інші резервуари з водою.

Радар «MARSIS» має низьку роздільну здатність, тож міг не побачити водойм розміром від кількох метрів до кількох кілометрів.

Тим часом відкриті водойми зараз не можуть існувати на поверхні Марса. Адже в умовах у сто разів меншого тиску, ніж на Землі, а також дуже низьких температур – вода або одразу замерзла б, або ж дуже швидко випарувалася. Скупчення певної кількості водяної пари, яка утворюється в атмосфері [49, 97, 100] планети, не скраплюється в атмосфері, а відразу перетворюється у кристали льоду, що осідають у вигляді інію.

Тому лише підземні та підльодовикові водойми залишилися від колись існувавшої потужної гідросфери Марса. Близько 4.3 млрд років тому її північну півкулю вкривав океан. А зараз – на супутникових знімках видно русла древніх річок (Рис. 17.1), сліди озер і масштабних повеней. Скоріше всього, більшість марсіанського океану випарувалася в космос разом із його атмосферою [13, 15, 128]. Причиною цього, через відсутність у Марса захисного магнітного поля, міг бути сонячний вітер, або потужна вулканічна діяльність [118, 145]. Тому колись можливо блакитна планета – тепер перетворилася на Червону пустелю. Решта води заховалася у полярних шапках і вічній мерзлоті, яка зараз вкриває майже всю поверхню планети.

Недавно виявилось, що ця мерзлота може у літні сезони іноді танути під впливом сонячних променів. А на знімках з марсіанських орбітальних станцій вдалося відкрити свіжі сліди потоків, які зовсім недавно стікали по нахилених до Сонця схилах марсіанських пагорбів у середніх широтах планети. Таким чином, деякі форми рельєфу на Марсі, такі як русла річок і ложа озер, вказують на те, що колись на поверхні планети була вода. Невелика кількість води є в тонкій марсіанській атмосфері й зараз, а полюси Марса вкриті крижаними шапками. Крім того, припускають, що темні смуги, які у літні сезони для даної півкулі [105, 113], з'являються на деяких схилах планети, можуть виявитися струмками дуже солоної води, або ж потоками піску.

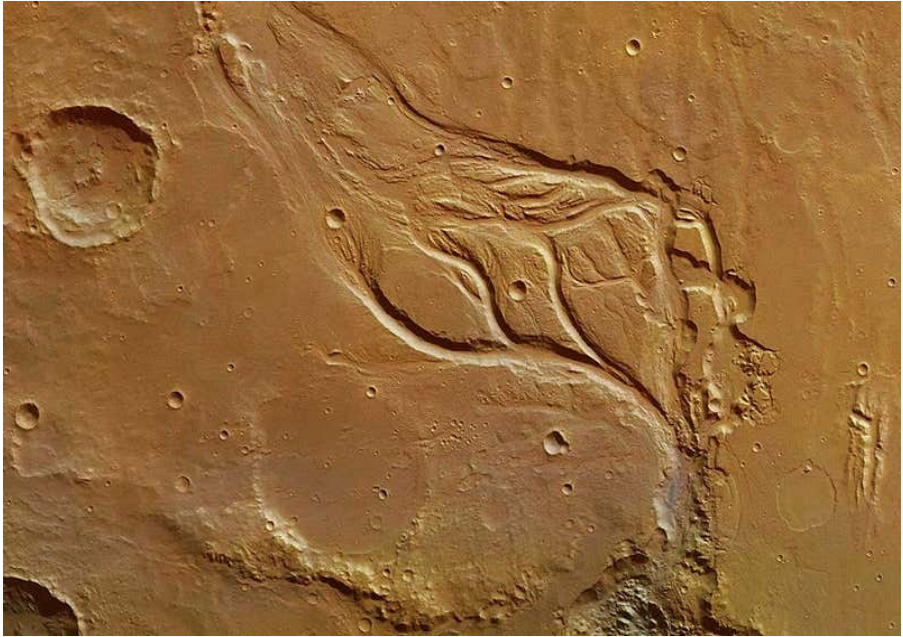


Рис. 17.1. Русла давніх річок на Марсі (<https://nauka.ua/news/>)

А інформація, що поступала з марсоходів, дозволила знайти свідчення присутності вологого середовища в скельному регіоні at Meridiani Planum, названому «El Capitan». На Рис. 16.4 (ліворуч) подано його зображення з панорамної камери «Mars Exploration Rover Opportunity», отримане із використанням червоного, зеленого та синього фільтрів. У цих породах були виявлені сульфати й мінерали, які могли сформуватися тільки за присутності води.

Пізніше схожу знахідку зробив марсохід «Спіріт», проникнувши в камінь названий «Humphrey» і зафіксувавши там наявність порожнеч, які могли утворитися тільки під впливом води. А в самих порожнечах виявилися відкладення мінералів, які могли утворюватися тільки у присутності води.

Нові результати були отримані також у результаті обробки спостережень установленого на апараті «Марс Експрес» Європейського космічного агентства спектрометра «OMEGA» (Observatoire pour la Mineralogie, l'Eau, les Glaces et l'Activite). За допомогою отриманих спектральних спостережень, на поверхні Марса вдалося виявити області, що містять водовмісні мінерали філосилікати і гідратовані сульфати (Рис. 16.5). Ці групи мінералів виникають унаслідок хімічних змін гірських порід.

Проте вони розрізняються механізмом утворення. Наприклад, філосилікати можуть утворюватися за тривалого контакту магматичних порід із водою. Тоді як для утворення гідратованих сульфатів дія на них води може бути порівняно нетривалою. Проте необхідно, щоб вода мала досить високу кислотність.

Знаходження цих мінералів на поверхні Марса вказує на присутність там води у перші кілька сотень мільйонів років. Причому, багаті філосилікатами відкладення були утворені на Марсі саме в давній геологічний період. Такий висновок вдалося зробити на підставі підрахунку кількості метеоритних кратерів і оцінки ступеня їх ерозії.

Отримані дані добре пояснюють, чому ділянки, де виявлені філосилікати, не пов'язані, наприклад, із пізніше утвореними на поверхні Марса сухими руслами. Тобто, подібні русла могли утворитися пізніше. Тому вода в них протікала відносно недовго і це не привело до утворення там філосилікатів. Зате в цих місцях у пізніші часи змогли утворитися гідратовані сульфати. Це мало місце тоді, коли атмосфера випарувалася і клімат на Марсі помітно змінився. Саме по цій причині кількість води суттєво зменшилася і стала значно кислішою.

18. Великі озерні басейни на Марсі.

Розуміння обсягів та стану води на Марсі має важливе значення для оцінки потенціалу планети для життя та надання ресурсів, які можна використовувати для майбутніх досліджень людиною. З цієї причини у першому десятилітті XXI століття NASA започаткувало Програму дослідження Марса з назвою «Слідувати за водою». Місії NASA та ESA, включаючи “Mars Odyssey”, “Mars Express”, “Mars Exploration Rovers” (MER), “Mars Reconnaissance Orbiter” (MRO) і посадковий апарат “Mars Phoenix”, отримували інформацію про наявність води та про її розподіл на Марсі. «Mars Odyssey», «Mars Express», «MRO» та «Mars Science Lander Curiosity» все ще працюють.

Загальновизнано, що Марс мав велику кількість води на початку своєї історії [126, 138]. Але всі великі області рідкої води з тих пір зникли. Вважається, що більшість марсіанського океану випарувалася в космос разом із його атмосферою. Причина цього – сонячний вітер. Адже у Марса немає захисного магнітного поля.

Рештки води заховані в полярних шапках та у вічній мерзлоті. Там вона замкнена в структурі багатих водою матеріалів, включаючи глинисті мінерали (філосилікати) і сульфати [60, 91, 132]. Дослідження ізотопного співвідношення водню вказують на те, що астероїди та комети, розташовані за межами 2.5 астрономічних одиниць, можуть бути джерелом марсіанської води.

На Марсі виявлено декілька озерних басейнів різного розміру [20]. Розміри деяких із них можна порівняти з найбільшими озерами на Землі. Одні озера є замкнутими западинами, в які впадають річкові руслові долини. Таким є басейн, що знаходиться в Terra Sirenum. Він міг перетікати через долину Маадім у кратер Гусев. Саме цей кратер був добре досліджений марсоходом «Spirit».

Інший озерний басейн знаходиться поблизу Долини Парана та Долини Луари. Вважається, що деякі озера могли утворитися у перші сотні мільйонів років в результаті випадання опадів, а інші – із підземних джерел. Тоді озера могли також існувати в басейнах Аргір та Еллада і, можливо, у Долині Марінер. Ці озера відповідають холодному, сухому гідрологічному середовищу.

За даними радіолокаційних спостережень ще в 1971 і 1973 рр. у Голдстоуні у районі Solis Lacus на Марсі було виявлено аномальну за відбивною здатністю деталь, з надзвичайно гладкою поверхнею. Одним із можливих пояснень цього могла бути присутність рідкої води на глибині всього близько 1 м.

Причиною цього могла бути зумовлена ексцентриситетом ($e=0,093$) асиметрія зміни сезонів [96, 107] у півкулях. Адже зміна сонячного потоку між афелієм і перигелієм досягає 40%. Тому літо в північній півкулі довше й холодніше, ніж у південній. Нижча ніж у перигелії температура спричинює конденсацію водяної пари в атмосфері на висоті нижче 10 км; там домінують направлені до екватора повітряні потоки глобального конвективного переносу.

Вище від рівня конденсації, вода проникати не зможе через швидке осідання кристалів конденсату мікронних розмірів під дією гравітації. Цей ефект приводить до утворення в афелії тропічного поясу хмар; він зберігає випарувану полярною шапкою воду в північній півкулі [97, 98]. Водночас у перигелії (у значно тепліший період часу) хмари слабо впливають на перенос між півкулями; тому вода, що випаровується з південної полярної шапки, перемішується більш рівномірно. За історично короткий час подібний сезонний «насос» цілком має можливість перекачати воду у напрямку тієї півкулі, в якій літо припадає на момент проходження планети через афелій орбіти. На початку XXI ст. практично всі марсоходи були націлені на пошук таких геологічних утворень, для формування яких необхідно, щоб там були водойми з тривалим часом існування [146].

Такі сліди можуть свідчити про те, що колись там були умови потрібні для зародження життя на Марсі [111, 117]. Отримані з орбітального апарату «Mars Reconnaissance Orbiter» нові дані, показують, що лід на планеті знаходиться не тільки на полюсах, але і в районах, розташованих практично на екваторі [100, 129, 144]. І якщо полярний лід ще можна пояснити особливостями сучасного клімату Марса, то наявність льоду близько від екватора – це дуже вагомий доказ на користь наявності води на Марсі. Причому останні знахідки говорять, що вода на планеті була або зовсім недавно, або залишається там порівняно неглибоко і зараз.

Влітку 2000 р. міжпланетна станція «Марс глобал сурвер» виявила на поверхні планети геологічні структури, які могли виникнути тільки під впливом могутніх потоків води. А на початку осені того ж року на переданих з Марса фотознімках гірських масивів планети було, можливо, зафіксоване величезне крижане море (озеро), під льодом якого може бути й вода (Рис. 16.1).

На основі вивчення численних знімків Марса з орбітальних КА вважається практично встановленим зв'язок між вулканічною активністю та потоками води на Марсі. У результаті вулканічної діяльності лід під поверхнею планети може танути, а вода просочуватися назовні.

Деякі із потоків мають достатньо молодий вік за геологічними мірками. Наприклад, біля підніжжя вулкана Олімп камери виявила сліди потоків, які, можливо, були там приблизно 30 млн років тому [118]. Дослідження у 2010 р. показали, що на Марсі були озера поблизу екватора і в багатьох пізніший період. Використовуючи детальні зображення з орбітального апарату «MRO», припустили, що в той період могла бути посилена вулканічна активність, численні удари метеоритів, або навіть відбулися зміни орбіти Марса. У сукупності ці фактори могли нагріти його атмосферу настільки, щоб розтопити льоди, присутні у замерзлом ґрунті.

Так, 27.09.2012 оголосили, що за даними з марсохода «Curiosity» знайдено прямі докази стародавнього русла річки в кратері Гейл. Це свідчило про давній інтенсивний потік води на Марсі [38]. Аналіз зараз сухого русла цього потоку показав, що вода тоді текла руслом глибиною понад 1 м із швидкістю близько 1 м/с [38]. Доказом потоків води є округла галька та уламки гравію, які могли утворювати лише сильні течії рідини. Інше озеро – Евіданія – є можливим стародавнім озером з площею поверхні до 1.1 млн км² (Рис. 18.1).

Його максимальна глибина становила до 2400 м при об'ємі 562 тис. км³. Вважають, що поверхня озера знаходилася на висоті мережі долин з дельтами (Рис. 14.1, праворуч), які оточують це озеро. Адже всі вони закінчуються практично на одній висоті. Це засвідчує те, що вони тоді впадали в це озеро.

Дослідження з радаром «CRISM» виявили потужні відкладення товщиною понад 400 м, які містили такі мінерали як сапоніт, багату на залізо слюду, Fe- та Mg-серпентин, Mg-Fe-Са-карбонати і Fe-сульфід. Вважають, що сульфід заліза міг утворитися на глибині за участі нагрітої вулканами води.

Дослідники знайшли багато прикладів дельт, які утворилися при впадінні у марсіанські озера. Знаходження дельт є основною ознакою того, що на Марсі колись було багато рідкої води. Для формування річкової дельти, звичай, потрібна наявність глибокої води протягом тривалого проміжку часу.

Крім того, рівень води повинен бути стабільним, щоб осад не вимивався. Причому, дельти були виявлені в широкому діапазоні широт [45]. Є й певні ознаки того, що дельти можуть бути зосереджені ще й навколо країв передбачуваного колишнього північного океану Марса [19]. З травня 2012 до грудня 2015 року радар «MARSIS» (Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionospheric Sounding) сканував фрагмент полярної шапки біля південного полюса з товщиною замерзлої води з пилом [62, 64] у 1.5 км. А

під час марсіанської зими його вкриває ще й шар твердого діоксиду вуглецю товщиною до 1 м, який сублимує з атмосфери. «MARSIS» двома антенами загальною довжиною 40 м емітує радіохвилі з частотами 3÷5 МГц. Такі хвилі проникають під ґрунт і лід, та відбиваються від меж різних шарів, крізь які вони проходять.

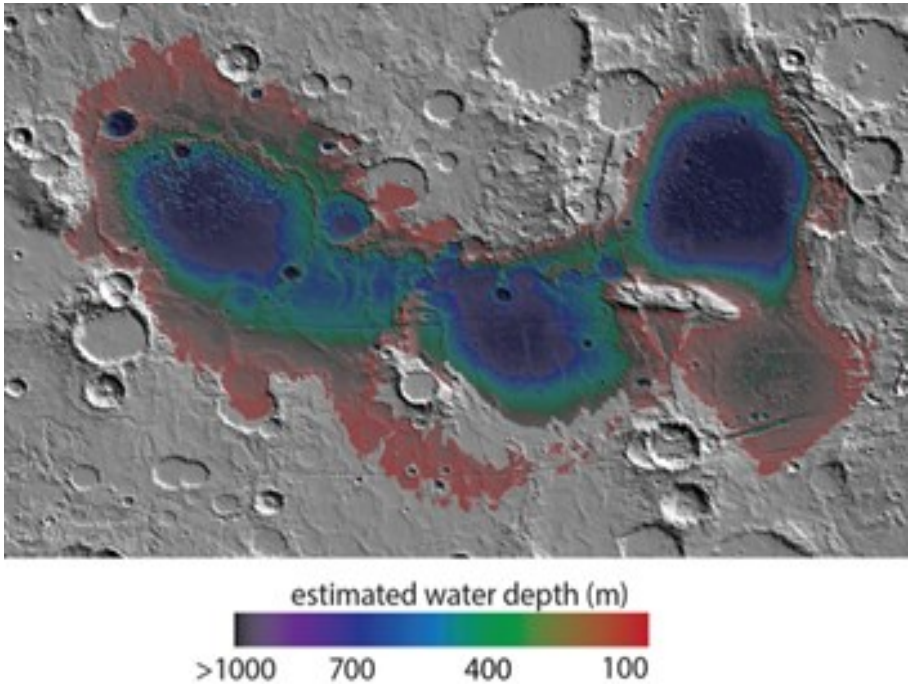


Рис. 18.1. Карта глибини залягання води в басейні Ериданії ([wikipedia/commons/2/28/PIA22059_fig1eridaniadepths.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eridania Depths.jpg)).

Аналіз відбитих від меж сигналів дозволяє отримувати геологічний розріз всієї досліджуваної ділянки, та локалізувати підземні пустоти, перешкоди та можливі резервуари. Саме так вдалося відкрити підльодовикові озера в Антарктиді та Гренландії. Радіосигнал, який проникає крізь льодовик, відбивається і від його основи.

Якщо ж він натрапляє на воду, відбитий сигнал буде значно сильнішим, ніж від скелястого ґрунту. Саме такий сигнал було отримано при дослідження південної частини марсіанської крижаної шапки діаметром понад 200 км. На глибині понад 1.5 км спостерігали чітке відбивання діаметром понад 20 км.

Про відкриття такого підльодовикового озера з прихованого товстою крижаною шапкою водою в рідкому стані повідомили у 2018 році [73, 78]. Це стало першим доказом стабільності рідкої води на цій планеті [23]. Виявлене озеро розташоване в точці з координатами 193°E, 81°S. Це була рівнинна місцевість без особливих топографічних характеристик. Але вона оточена підвищеннями і западиною зі східної сторони [127, 137].

Згідно підрахунків, температура у підніжжя льодовика на Марсі опускається до 205 К. Існування рідкої води в таких умовах пояснюють зниженням температури замерзання води внаслідок тиску 1.5 км товщі льоду, та наявністю мінеральних солей, які у ній розчинені.

Адже знайдені на Марсі солі натрію, магнію і кальцію зменшують температуру замерзання води аж до -74 °С. Знайдений об'єкт – це шар рідкої води глибиною щонайменше близько 1 м (саме таким повинен бути шар води, щоб його побачив «MARSIS»).

У 2019 році було опубліковано дослідження, яке вивчало фізичні умови, необхідні для існування такого озера [83]. У цьому дослідженні розраховано кількість тепла від планети, яке необхідне для досягнення таких температур, при яких суміш рідкої води й перхлорату набувала б стабільного вигляду під шаром льоду [41]. Адже для збільшення імовірності існування рідкої води необхідна наявність в межах 10 км від озера локального джерела тепла в корі планети.

28.09.2020 відкриття озера апаратурою «MARSIS» було підтверджено за допомогою нових даних і повторного аналізу попередніх даних за допомогою новішої техніки. Ці нові радарні дослідження повідомили про ще три підлідні озера на Марсі. Усі вони знаходяться на 1.5 км глибше видимого рівня південної полярної шапки.

Вдалося уточнити розмір першого найбільшого озера до 30 км у діаметрі. Воно виявилось оточеним трьома меншими озерами, кожне діаметром по кілька кілометрів [54, 73]. Оскільки температура в основі полярної шапки оцінюється в 205 К (-68 °С), то припускають, що вода там залишається рідкою через ефект антифризової дії перхлоратів магнію та/або кальцію [54]. Високий рівень солі в озері може створити труднощі для більшості форм життя. Але на Землі існують організми, названі галофілами. Вони розвиваються у надзвичайно солоних умовах, але не в темних, холодних, концентрованих перхлоратних розчинах [83].

Вважають, що галотолерантні організми можуть справлятися з підвищеними концентраціями перхлорату, спираючись на фізіологічні адаптації, подібні до тих, що спостерігаються у дріжджів *Debaryomyces hansenii*, підданих у лабораторних експериментах зростаючим концентраціям NaClO_4 . Зрозуміло, що значна кількість води на стародавньому Марсі залишилася, але, здебільшого, вона, ймовірно, протягом багатьох років сховалася в скелях і в корі планети [80].

19. Про можливості існування рідкої води на поверхні Марса за сучасних умов.

У результаті проведених досліджень Марса було отримано висновок про те, що в минулому вода в рідкому вигляді могла бути присутньою на поверхні планети. Донедавна вважали, що «перехід» від «вологого» до «сухого» Марса стався близько 3.5 млрд років тому.

Проте аналіз зібраних місією «Mars Reconnaissance Orbiter» даних дозволив прийти до висновку, що рідка вода існувала на поверхні Марса майже на мільярд років довше [43, 101, 126, 138, 146]. Причому, по поверхні планети текли потоки води, існували постійні водойми у вигляді озер, морів та океану; в них могли бути навіть умови для формування життя [85, 111, 115, 117].

Пізніше клімат планети змінився. Вона втратила більшу частину атмосфери та води, перетворившись на холодний і посушливий світ [126, 138]. То ж більша частина води на Марсі нині існує у стані криги. І водного льоду на Марсі – багато. Крижаними шапками покриті полярні області Марса; лід також знаходили на схилах деяких ярів; а під рівниною Утопія знайшли замерзлу водойму.

Побудовані карти солевих відкладень, які залишились у південній півкулі планети на місці висохлих водойм, дозволили з'ясувати, що багато покладів солі міститься в западинах, розташованих у пологих вулканічних рівнинах. Саме там колись розташовувалися невеликі озера. Поблизу багатьох із них знайдені звивисті канали. Ними є гирла колишніх струмків, що впадали у ці водойми. Оцінки віку цих покладів показали, що деякі із солевих відкладень (Рис. 19.1) сформувалися лише 2 млрд років тому.

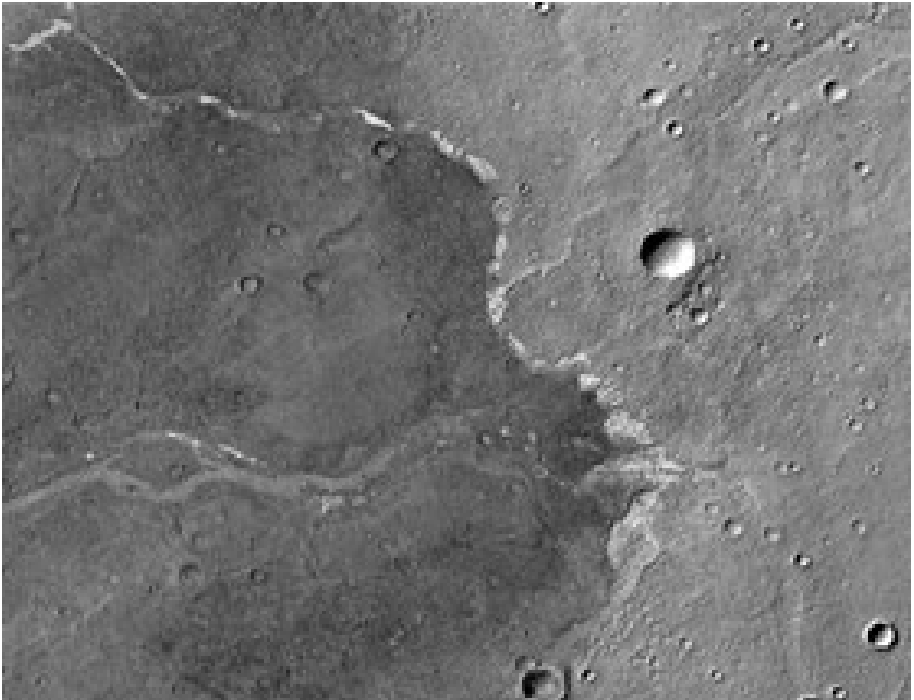


Рис. 19.1. Одне із соляних відкладень на Марсі (ASA/JPL-Caltech/MSSS).

З нинішніми низькими значеннями атмосферного тиску і низькою температурою чиста вода в рідкому стані на поверхні Марса не може існувати в стабільній формі. Винятком можуть бути лише деякі западини: протягом декількох годин [42, 70].

Адже спостереження з орбітального апарату MRO виявили відкладення в ярах, яких не було ще кілька років тому. Можливо, що вони могли бути спричинені потоками рідкого розсолу в найтеплішому місяці на Марсі [40]. Два зображення кратера в області Terra Sirenum (Рис. 19.2) демонструють наявність таких потоків на Марсі в якийсь момент між 1999 та 2005 роками [40, 135].

Деякі дослідження засвідчують, що яри, які утворюються на південних нагір'ях, можуть бути утворені твердим вуглекислим газом. Він теплим літом може танути, утворювати рідкий вуглекислий газ, який потім утворюватиме на схилах глибокі канали [57], які зберігаються цілий рік.

На Марсі є багато інших особливостей, і деякі з них змінюються сезонно [13, 96, 105, 113]. Спектрометр CRISM проводив ще й прямі спостереження водних соляних розчинів, що з'явилися одночасно з утворенням цих повторюваних ліній на схилах; так, в 2015 році вдалося підтвердити, що ці неглибокі канали утворюються потоком рідких розсолів через ґрунти.

У таких каналах знайдено гідратовані хлорати та перхлорати (ClO_4^-) [41], які містять ще й молекули рідкої води. Подібні потоки стікають донизу марсіанським літом, коли температура стає вищою від 250 K [129].

Чиста рідка вода нестійка на поверхні планети, оскільки піддається замерзанню, випаровуванню та кипінню [36]. Цілком можливо, що рідка вода також могла існувати на поверхні Марса через утворення розсолів, про що свідчить велика кількість гідратованих солей [12]. Розсоли важливі на Марсі, оскільки вони можуть стабілізувати рідку воду при нижчих температурах, ніж чиста вода сама по собі [36].

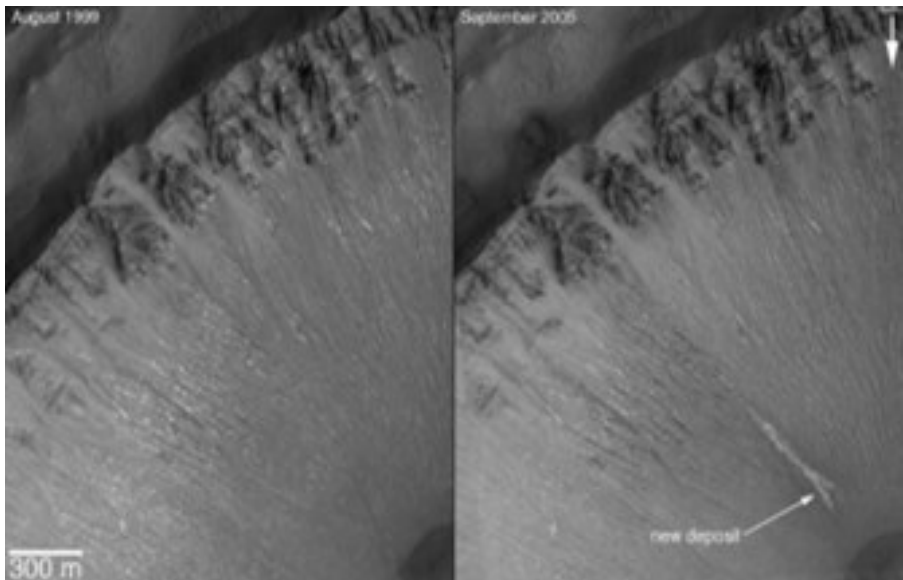


Fig. 19.2. Алювіальні потоки на схилах безіменного кратера в області Terra Sirenum між серпнем 1999 і вереснем 2005 р. (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Зумовлена ексцентриситетом ($\epsilon = 0.09$) асиметрія зміни сезонів у півкулях, приводить до зміни сонячного притоку між афелієм і перигелієм до 40%. Тому літо в північній півкулі довше й холодніше, ніж у південній. Нижча ніж у перигелії температура спричинює конденсацію водяної пари в атмосфері на відносно невеликій висоті (нижче 10 км). Саме там домінують направлені до екватора повітряні потоки глобального конвективного переносу.

Склад марсіанського реголіту, визначений посадковим модулем «Фенікс», можна використовувати для обмеження цих моделей і дати точне уявлення про те, як насправді можуть утворюватися розсоли на планеті [11]. При температурах від 208 К до 253 К хлорати демонструють найнижчі значення активності води.

Результати моделювання показують, що вищезазначені складні суміші солей істотно не підвищують стабільність розсолів, вказуючи на те, що розсоли не можуть бути значним джерелом рідкої води на поверхні Марса.

Але все ж існують свідчення того, що вода в рідкому стані могла відігравати відчутну роль при формуванні деяких із знайдених на крутих схилах плато, кратерів та інших депресій деяких утворень, подібних до стоків води. Такі канали утворюються при стіканні селів, забрудненої рідини тощо схилами вниз від областей їх просочування (рис. 19.2). При сходженнях селів на Марсі – вода у рідкому стані навряд чи зможе досягати дна схилів; вона там випаровується, або ж замерзає.

Із припущення, що склад ґрунту подібний до ґрунту селевих потоків [144] на Землі, доля води складає 10-30% за об'ємом; при товщині покладів ґрунту біля підніжжя потоків до 2 м, вирахували, що при 10% вмісті води її об'єм у кожному такому потоці має перевищувати 25 тис. м³. Вважають, що потоки в приполярних областях можуть бути обвалами або лавинами киплячого сухого льоду, який несе із собою пісок, пил і каміння (Рис. 19.3).

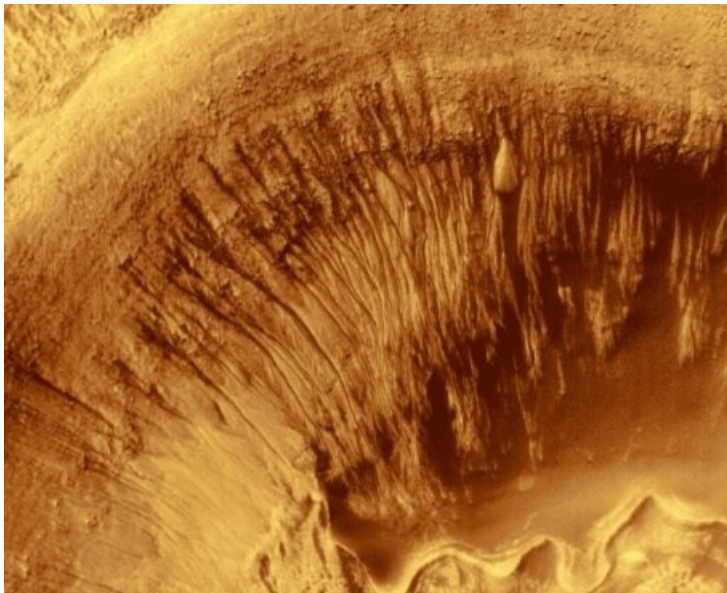


Рис. 19.3. Яскраві смуги з розгалуженими закінченнями характерні для «алювіальних» потоків в кратері Ньютона; зображення у 2000 р. (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Дані еродовані утворення являються прикладом утворення багатьох водостоків на крутих обривах рівнинних плато. При дослідженнях особливу увагу приділяли розчину, до складу якого входить сульфат тривалентного заліза $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$. Саме він був виявлений у деяких геологічних формаціях планети.

Виявилось, що температура замерзання цього розчину дорівнює близько 205K при концентрації сульфату заліза 48% за масою. Через поєднання таких властивостей прийшли до висновку, що такий розчин має можливість залишатися у рідкому стані і при існуючих в даний час умов на Марсі.

Водойми, якби вони існували, неминуче б замерзли і випаровувалося б під впливом сонячного випромінювання.

Дослідження Марса космічними апаратами «Mars Global Surveyor» й «Mars Odyssey» доводять, що під поверхневим шаром полярних шапок на глибині не більше 5 м знаходиться величезна кількість водяного льоду, а можливо й вода у рідкому стані. Деякі особливості рельєфу явно подібні до вигладжених льодовиками ділянок.

Наприклад, біля підніжжя вулкана Олімп камери виявила сліди потоків, які, можливо, були там приблизно 30 млн років тому [100, 118].

Багато фотографій отримали космічними апаратами «Mars Global Surveyor» у 1999, 2001, 2004 і 2005 рр. Їх аналіз дозволив виявити зміни, які могли б відбутися лише за участі рідини. Подібні відкладення – і це могла бути сіль, чи грязь, або ж іній – залишалися після потоків рідини [62, 65, 91].

Тобто Марс слід вважати геологічно активнішим, ніж це уявлялося раніше. Причому, така потокова активність зосереджена переважно в середніх широтах.

І, нарешті, були знайдені зовсім свіжі, не старші від кількох років, структури, схожі на сліди рідини, що просочується з-під кори вічної мерзлоти [33]. Причому, за багатьма ознаками вода, можливо, й донині продовжує свою геологічну діяльність.

Характерно, що усі подібні сліди від водано-селевих ерозій (Рис. 19.4) були виявлені на північних схилах глибоких каньйонів у північній півкулі і на південних схилах у південній півкулі [56], де атмосферний тиск хоч і ненадовго, але дозволяє зберегти воду від моментального холодного закипання.

Саме після аналізу повторних на інтервалі декількох років знімків одних і тих же ділянок марсіанської поверхні були отримані надійні свідчення того, що вода все ще іноді тече по поверхні Марса принаймні по декількох його територіях.

На отриманих у 2004-2005 рр. фотографіях з космічного апарата «Mars Global Surveyor» містяться яскраві смуги з «гіллястими» закінченнями, характерними для так званих «алювіальних потоків» (Рис. 19.3), яких ще не було на зображеннях тих же місць, отриманих у 1999 і 2001 рр.

І така форма відкладень повністю відповідає перенесенню матеріалу проточною водою. Показаний на Рис. 19.4 схил розташований у південній півкулі Марса – приблизно на 37° широти, де денні температури можуть перевищувати 0°C. Тому присутність там води у вигляді рідини є цілком можливою. Отримані в останні роки спостережені дані показали, що Марс і сьогодні є геологічно доволі активним тілом. Вода на цій Червоній планеті суттєво впливає на формування рельєфу її поверхні. Причому, запаси води – мають бути достатньо великими. Представлені на Рис. 19.5 еродовані особливості є прикладом багатьох водостоків.

Як видно, шар, з якого виходять водостоки, мав достатньо часу для того, щоб сформувати виступ нижче твердішого шару скелі. У місці порівняно більших водостоків сформувалися і більші осипання твердішого ґрунту вище за виступ.

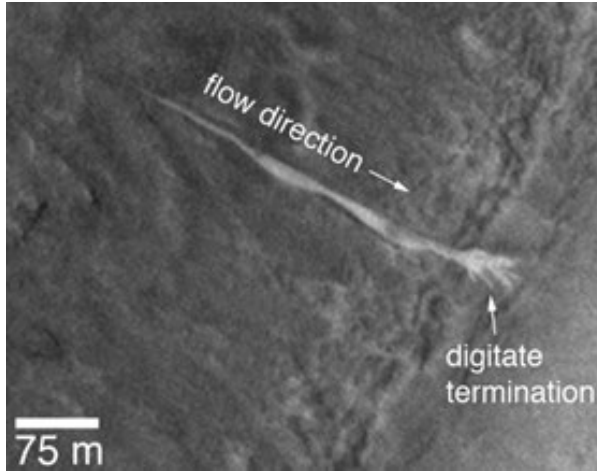


Рис. 19.4. Можливий селевий потік світлого кольору, що мав місце у 2005 р. (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Нижче від можливого водоносного шару помітно темні вузькі канали, по яких і відбувалося сходження селів. І хоча темний колір каналів на цьому зображенні, ймовірно, й не є результатом наявності там мокрому ґрунту саме у даний момент, проте він все ж свідчить, що вода просочилася із землі і рухалася по схилу донизу зовсім недавно.



Рис. 19.5. Осипи ґрунту і яри на схилі одного з кратерів; вони схожі на сліди земних гірських річок, але звужуються вниз по схилу (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Адже досить помітні контрасти між темними і світлими областями навряд чи змогли б підтримуватися на Марсі протягом тривалого часу, тому що пил досить швидко покрив би темнішу поверхню і зменшив би відмінності у її яскравості.

Такий аналіз дозволив припустити той факт, що представлена на даному зображенні область могла лише декілька років тому піддаватися ерозії водою внаслідок її просочування із ґрунту. Товщина залягання такого водоносного шару у даному місці Марса не перевищує 100 м.

20. Сучасний вигляд колишніх рік на Марсі.

Зараз поверхня планети Марс представляється безжиттєвою та безводною пустелею, над котрою лютують бурі, які здіймають пісок та пил на висоти до кількох десятків кілометрів. Під час цих бур швидкість вітру може перевершувати сотню метрів за секунду. Сучасне значення середнього тиску повітря біля поверхні Марса, котре становить 0.006 тиску у земній атмосфері, є дещо меншим від значення потрійної точки води. Цей факт означає, що в цей час відкриті водойми на поверхні Марса існувати не зможуть. А вода на цій планеті міститься або як вічна мерзлота у товщі ґрунту, або ж у вигляді відкритого льоду та снігу, а ще, у зовсім невеликих кількостях – у вигляді газу в атмосфері.

Відкрите водоймище, якби воно існувало, неминуче б замерзло і почало випаровуватися під впливом сонячного випромінювання. Найбільш відомий зараз великий резервуар водяного льоду на Марсі – це північна полярна шапка [101, 109]. Вважається, що у південній полярній шапці водяного льоду значно менше, і там міститься до 4% сухого льоду CO₂.

Однак останні дослідження Марса космічними апаратами «Mars Global Surveyor» and «Mars Odyssey» довели, що під поверхневим шаром на невеликій глибині знаходиться величезна кількість льоду, а можливо й вода у рідкому стані. У дуже розрідженій атмосфері Марса зараз також є водяна пара.

А ще певні ознаки текучої води сезонно [96, 97, 105, 113] знаходять і на поверхні планети. Тобто, колись на Марсі мали існувати постійні водойми, а можливо, й цілий океан. В них могли бути навіть умови для формування життя [62, 85, 86, 111, 115, 117].

Аналіз зібраних місією «Mars Reconnaissance Orbiter» даних дозволив прийти до висновку, що рідка вода у значній кількості існувала на поверхні Марса лише 2-2.5 млрд років тому [43, 146]. Це говорить про те, що у минулому Марс мав повноцінну гідросферу і досить потужну атмосферу з тиском біля поверхні понад 0.4 бари. Пізніше клімат планети змінився. Вона втратила значну частину атмосфери та води, перетворившись на холодний світ [11, 29, 49].

Наявність на поверхні Марса численних звивистих долин з великою протяжністю, з притоками і островами, що нагадують висохлі русла земних річок, повинне свідчити про те, що раніше на поверхні Марса були такі умови, при яких була можливість для існування рідкої води на поверхні [12, 41, 61].

Значна доля води, що колись, можливо, текла по сухих в даний час руслах (Рис. 20.1), зараз має знаходитися під поверхнею планети. Хоча ці дані потребують уточнення і деталізації, та наявність великих запасів води в мерзлоті під поверхнею було б цілком очікувано і логічно передбачена.

Зараз точно невідомо як довго тривали сприятливі для існування рідкої води умови на поверхні Марса, та чи були русла результатом тривалої дії рівномірно протікаючої води, або ж їх виникнення пояснюється якимись катастрофічними діями величезної маси води протягом короткого часу, яка по якійсь причині переходила із одного місця до іншого. Зазвичай ці марсіанські русла досить глибокі й дуже прямі для того, щоб бути руслами річок у звичному розумінні.

Вони дуже мало схожі на русла земних річок, але при цьому достатньо близькі до долин льодовиків. Можливо, саме льодовики і є відповідальними за їх утворення. Іншою гіпотезою утворення марсіанських русел є припущення про існування епохи гідротермальної активності, що мала місце у порівняно недавньому минулому.

За оцінками, у товщі вічної мерзлоти можуть утворюватися досить великі (завтовшки 30-100 м і діаметром до 10 км) лінзи рідкої води, які підігріваються локальною тектонікою. У деяких випадках лінза може перегрітися й закипати.



Рис. 20.1. Знімки долин Маадім (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

За таких умов витіснення деякого об'єму води на поверхню може привести до утворення катастрофічного селевого потоку, який може створити глибокий каньйон. Згідно цій гіпотезі, русла виявляються результатом дії не рідкої води, а сумішшю грязі, льоду й пари, що протікають лише епізодично. Є й інші гіпотези. Найпомітнішими з деталей марсіанського рельєфу такого вигляду – є долини Маадім і Ніргал (Рис. 20.2).

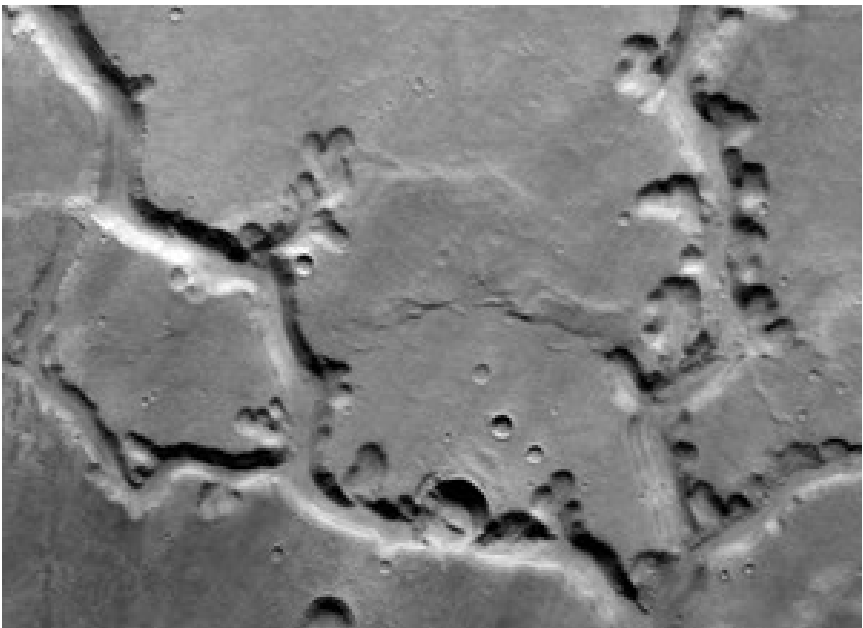


Рис. 20.2. Русло долини Ніргал (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Сліди, що свідчать про те, що глибоко під поверхнею Марса колись давно текла вода, проявилися завдяки розломам, викидам і зсувам, виявленим на поверхні планети.

Скоріше всього, вода текла по довжелезним підземним каналам природного походження, які після мільйонів років обвалилися і таким чином проявилися на поверхні. І хоча ерозія попрацювала і над ними, і над навколишнім ландшафтом, та все ж навіть тепер тут можна знайти сліди, імовірно, давно існувавших водних потоків.

Раніше, вивчення слідів дії рідкої води на поверхні Марса, вказувало на такі деталі рельєфу, котрі, ймовірно, колись були або руслом річок, або ж дном озер та морів, чи проявом ерозії рідкої води.

Тепер же черговим свідченням водяного минулого на Марсі стало спостереження каньйону Candor Chasma (Рис. 20.3) з просторовою роздільною здатністю краще 1 м, при яких стали видимі дуже цікаві геологічні деталі. Так, у роботі [71] представлені дані, які дозволили знайти тонкі смужки світлого матеріалу уздовж ліній розломів, що тягнуться на декілька кілометрів (Рис. 20.4).

Вважалося, що спочатку це була, умовно, «труба», по якій текла рідина (вода, рідкий вуглекислий газ з водою, або без неї) з розчиненими в ній речовинами.

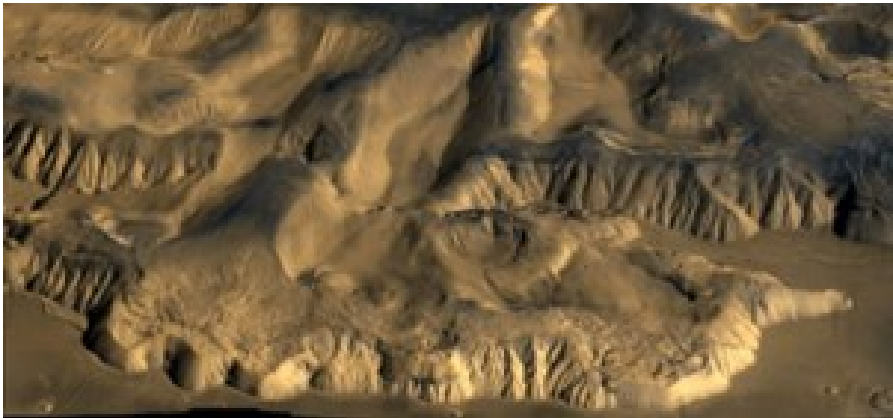


Рис. 20.3. Каньйон Candor Chasma (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Речовини з потоку випадали в осад і накопичуючись на стінках «трубопроводу». Через сотні мільйонів років ерозія дуже сильно змінила цю місцевість, і те, що було під поверхнею, виявилось тепер на поверхні. Це й привело до появи на темному фоні світлих смужок.

Ці глибокі підземні області могли бути своєрідними оазами для різноманітної біологічної діяльності, яка, можливо, там відбувалася [64, 71]. Тому вони (у поєднанні із вкритими глинами ділянками Марса) можуть бути ще одним досить перспективним місцем, пов'язаним із пошуком слідів життя. Адже такі ж само смужки уздовж багатьох тріщин та зламів на поверхні вдалося виявити не лише на зображеннях Candor Chasma, а й в деяких інших регіонах планети. Подекуди планетна поверхня вкрита багатшаровими породами, які дуже схожі на осадові породи на нашій планеті, що залишилися після відступу морської води.

Серед утворень, виявлених на поверхні Марса, особливої уваги заслуговують руслоподібні проточні канали і так звані меандрові долини [91, 100, 125, 132, 144]. Їхній зовнішній вигляд і наявність приток навряд чи можна пояснити інакше, ніж запропонувавши, що це висохлі русла річок.



Рис. 20.4. Світлі ділянки скель на зображенні камери «HIRISE» з орбітального модуля «Mars Reconnaissance Orbiter» (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Звичайно, в цей час на поверхні Марса ріки текти не можуть, і зараз там практично не може бути рідкої води. Адже при такому невеликому тискові, існуючому в цей час на планеті, вода закипає при дуже низьких температурах. Проте жодна інша рідина навряд чи змогла б утворити спостережувані русла.

Адже, наприклад, лава дуже швидко остигає, а рідка вуглекислота – навіть у земних умовах не може існувати. Та й меандри могли з'явитися лише за присутності існуючих раніше водних потоків у вигляді річок. І оскільки зараз для цього немає необхідних умов – то вони могли бути в минулому. Для цього потрібно допустити, що в більш ранні епохи атмосферний тиск на Марсі був значно вищий, ніж у цей час, і в далекому минулому він був теплішою й вологішою планетою.

Втім, є й інше пояснення меандрам. Можливо їх залишили рухомі маси льодовиків, які залишають глибокі борозни і на поверхні Землі. Крім того, з'ясувалося, що темні області не завжди є западинами. А деякі з них, наприклад Великий Сірт, представляють собою піднесені плато зі схилами у всі сторони.

Детальні дослідження показують, що багато із цих русел йдуть від долини Марінер і могли виникнути в ході якоїсь раптової повені. Ще деякі особливості рельєфу явно нагадують вигладжені льодовиками ділянки. Судячи із хорошого збереження таких форм, котрі не були зруйновані, та не покрилися наступними нашаруваннями, тому вони мають порівняно недавнє походження, яке не перевищує тривалості останнього мільярда років.

Тому, існують всі підстави того, щоб вважати, що води на цій планеті є багато, і те, що замерзла вода має існувати і зараз під виглядом вічної мерзлоти. Докладні знімки поверхні Марса, які отримала орбітальна станція «Марс Одісей», дали змогу виявити

відразу декілька «живих» льодовиків у середніх широтах, досить далеко за межами крижаних полярних шапок планети.

На наведеному на Рис. 20.5 знімку можна відмітити досить цікаву обставину, коли лінії уступів у долин марсіанських льодовиків виглядають, на відміну від таких утворень на Землі, практично непошкодженими і не розмитими. Це можна пояснити, наприклад, тим, що на Марсі льодовики, в основному, не танули (як на Землі), а відразу ж перетворювалися в пару через дуже розріджену марсіанську атмосферу (тобто, сублімували).

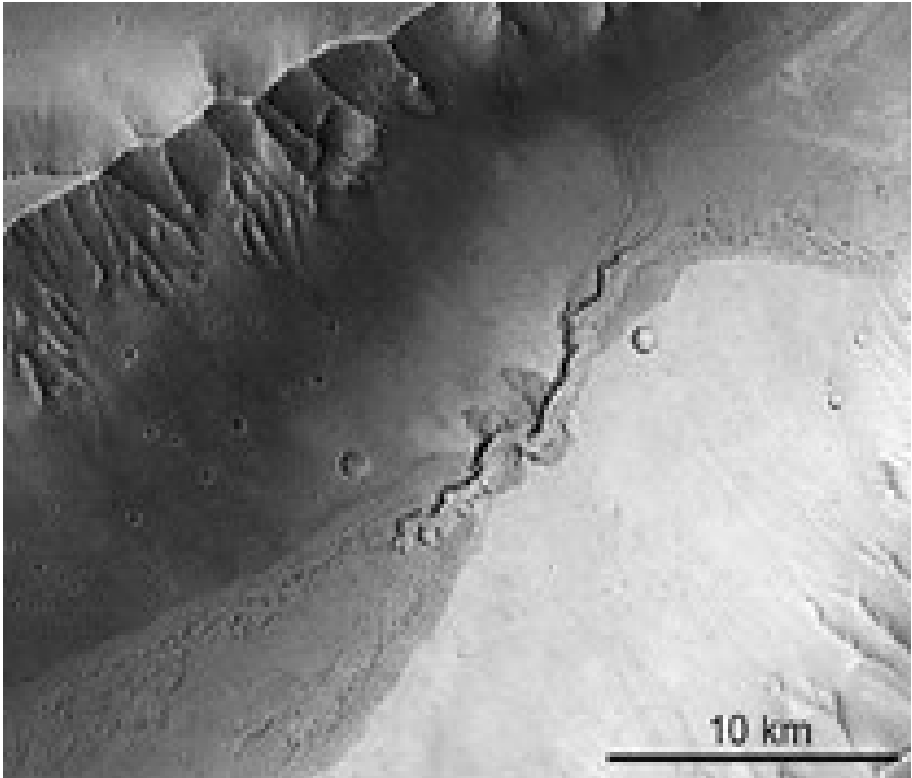


Рис. 20.5. Долина з льодовиком на середніх широтах. Видно, що лінії уступів марсіанських льодовиків виглядають практично не розмитими (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Судячи з хорошого збереження форм в області Noctis Labyrinthus (Рис. 19.6), які не встигли ні зруйнуватися, ні покритися наступними нашаруваннями, вони мають відносно недавнє походження (у межах останнього мільярда років).

Одна з найбільших систем каналів на Марсі – є область Noctis Labyrinthus (Рис. 20.6). Вона містить значну кількість доказів як льодовикової, так і річкової активності, яка супроводжувала значну тривалість геологічної історії Марса.

Промоїни на дні і сліди розмивання в цій долині, найімовірніше, виникли під впливом льодовикової, а не водної ерозії.

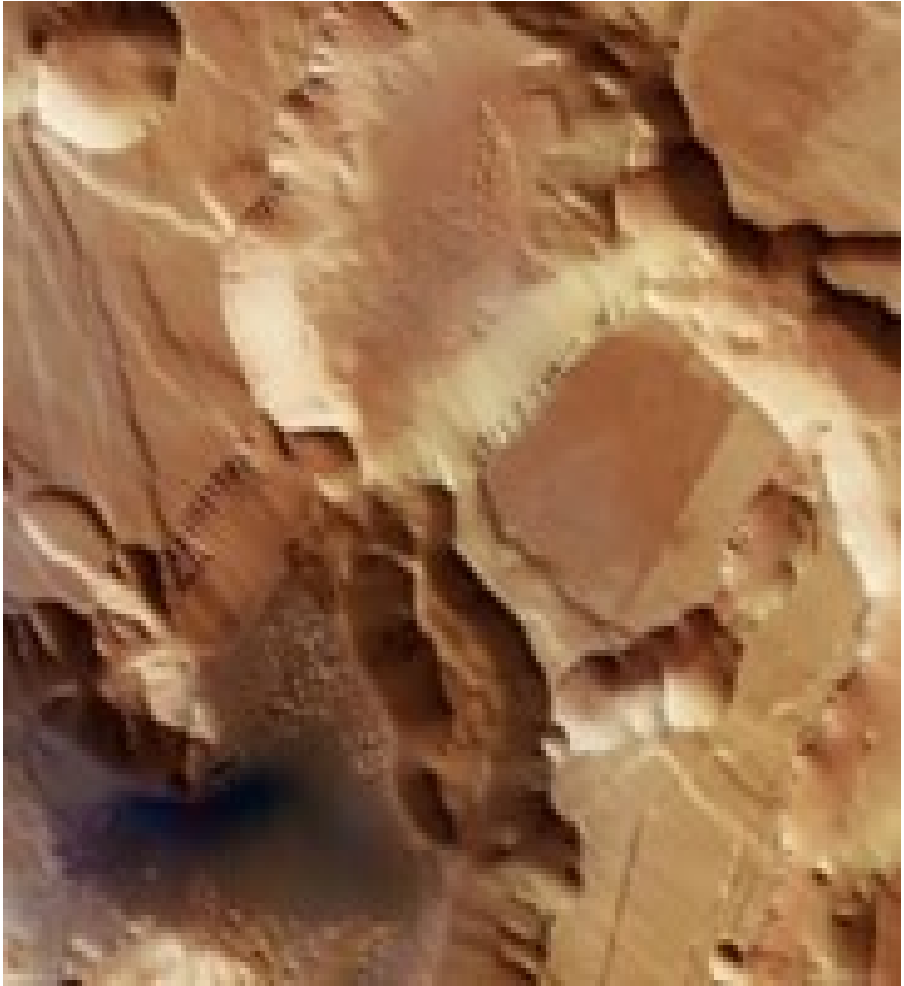


Рис. 20.6. В області Noctis Labyrinthus майже відсутні кратери у каналах; це вказує на їх геологічну молодість; глибина долин – 100 м, ширина – до 3 км (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Льодовик, який створив таку долину, живився водами області, названої Echus Chasma (Рис. 20.7), яку знизу підігрівали вулкани [118, 119, 145]. Саме подібна вулканічна активність й зумовила появу величезних потоків талої води у зовсім недавню геологічну епоху: до двадцяти мільйонів років тому.

Зображення Echus Chasma вказує на те, що на цій ділянці поверхні Марса, вода у рідкому стані була менше одного мільярда років до цього.

Пізніше, планета остигла, озера замерзли і сформували льодовики, котрі своїми потоками й «порізали» долину Kasei Valles. Одним із доказів подібної теорії являється той факт, що дно цих «каналів» розташовується нижче від стародавнього рівня океану на Марсі. Це неможливо для води, але добре виконується для льоду.

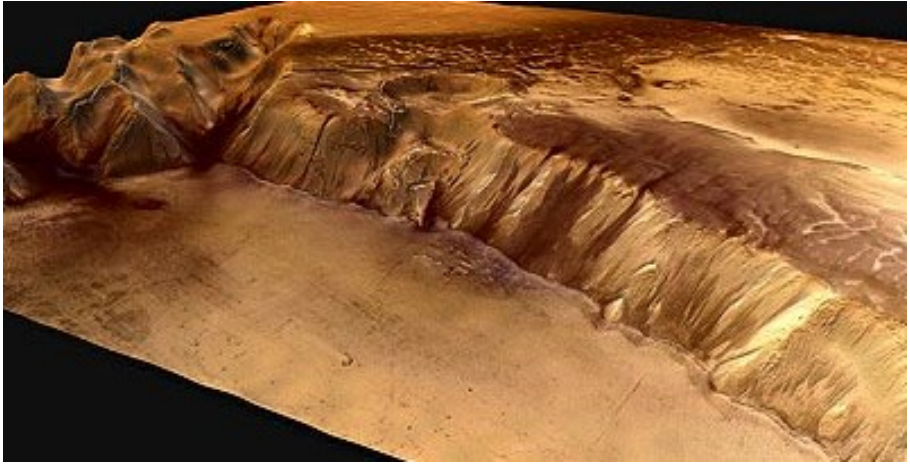


Рис. 20.7. Область Echus Chasma (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

21. Як пов'язані стародавні русла річок і недавні потоки води на Марсі.

Ретельні дистанційні дослідження та вивчення Марса за допомогою космічних апаратів показали, що є всі підстави вважати, що води на планеті багато й зараз. Хоча в атмосфері концентрація водяної пари [49, 62] незначна, та ще й істотно змінюється в залежності від пори року [57, 113]. Деякі особливості рельєфу явно на планеті нагадують зглажені льодовиками ділянки.

Там знайдені системи долин довжиною в сотні кілометрів, схожі на сухі русла земних річок. Перепади їх висоти відповідають напрямку течій. Існуючі форми рельєфу на поверхні Марса добре збереглися; вони не є зруйнованими, і не покриті нашаруваннями. А, отже, вони мають порівняно недавнє походження: скоріше всього, менше мільярда років.

На Рис. 21.1 показано зображення поверхні Марса із системами, подібними до існуючих на Землі, в яких вода формувала рельєф протягом тривалого періоду часу.

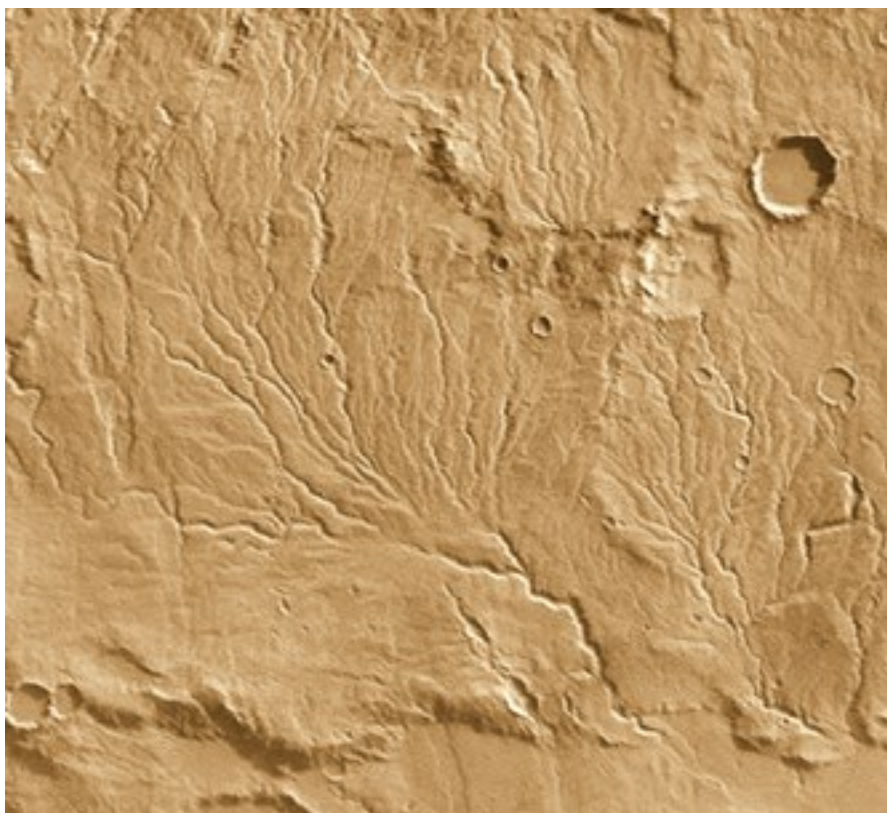


Рис. 21.1. Системи висохлих русел з притоками на фото з апарату «Вікінг» (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Мережі марсіанських долин скоріше всього були утворені відносно невеликими потоками. Тому припускають, що вони утворилися переважно водою, яка витікає з-під поверхні, а не опадами. Зараз рідка вода на поверхні Марса є дуже нестабільною.

Теоретичні розрахунки показують, що такі повільні підземні води також можуть утворювати подібні мережі долин у випадку, якби вода витікала, наприклад, з-під замерзлого льоду чи нагрівалася вулканами [118, 145]. Знайдені зараз мережеві долини розташовані переважно у відносно старих регіонах Марса. Тому їх присутність на поверхні може свідчити про те, що колись Марс мав теплий та вологий клімат [4, 126, 129, 138].

Існуючі зараз канали, розташовані на півночі та сході від системи каньйонів Долини Марінерів могли бути сформованими водою [101, 102, 146], яка повинна була б мати жахливу ерозійну силу.

Саме в результаті такої ерозії острови, видимі на Рис. 21.2, утворювалися б дуже швидко, як тільки б вода зустрічала певні перешкоди на своєму шляху.

За таких умов на дні русел цих річок мали б утворитися шари різнорідних структур [11, 91], у яких можна буде спробувати знайти навіть сліди певних життєвих форм [85, 90, 115, 117].



Рис. 21.2. Два «острови», утворені кратерами діаметром 8-10 км, розташовані в долині Арес; висота схилу, що оточує верхній острів – 400 м, нижній – 600 м (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Подібним же чином шаруваті шари на Марсі можуть складатися із осадових порід [144, 145], які утворювалися колись на дні стародавніх озер та морів. Хоча можливо, що подібні конструкції могли бути зобов'язані своєю появою і зовсім іншим процесам.

Відзначимо, що подібні утворення в каньйонах були виявлені ще в 1970-тих роках орбітальними апаратами "Марінер-9" та "Вікінги". Проте камери «Mars Global Surveyor» дозволили дослідити ці ж структури зі значно кращим просторовим розділенням [100, 132, 137], ніж це було можливим раніше [60, 65]. Передані з марсоходів «Спіріт» та «Оппортьюніті» зображення дозволили провести значно детальніше дослідження цих шаруватих структур (Рис. 21.3).



Рис. 21.3. Марсохід «Оппортьюніті» в 2007 році вирушив до зображеного на фото мису Сент-Вінсент на краю кратера Вікторія (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Щодо причин утворення подібних каналів і русел, то ще існує й припущення, що вони могли виникнути як внаслідок вивітрювання, так і могли бути осадовими породами у стародавніх водоймах.

Наприклад, на зображенні на Рис. 21.4 можна розрізнити до сотні однорідних окремих шарів ґрунту товщиною до десятка метрів, які є досить міцними для утворення крутих уступів. На Землі схожі структури утворюються із осадових порід, які протягом тривалого часу накопичуються на дні великих водойм.

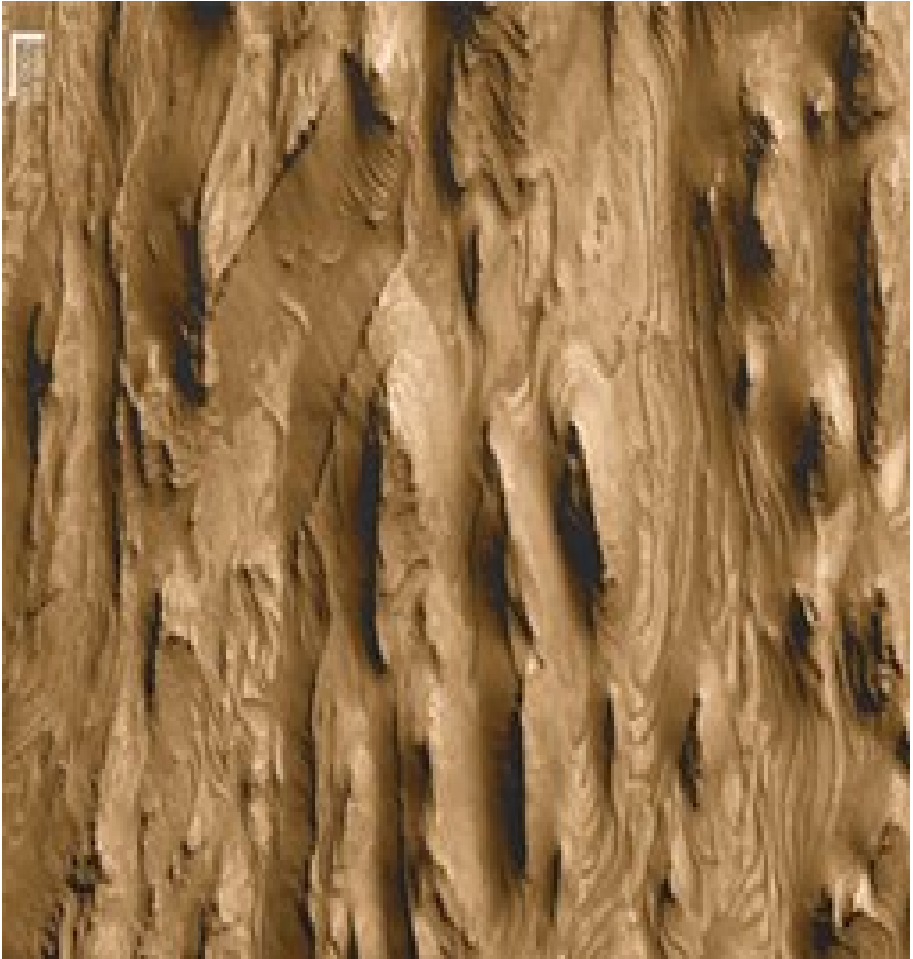


Рис. 21.4. Зображення «Mars Global Surveyor» 2003 року показує донні відкладення шаруватої структури на дні Candor Chasma в долинах Марінера. 20.09.2007 (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Проте, оскільки при нинішній температурі та тиску на планеті рідка вода не може існувати, до вважалося, що формування подібного рову закінчилося мільйони років тому. Однак 16.02.2009 на одній із переданих на Землю апаратом "Mars Global Surveyor" фотографій – були виявлені дуже свіжі сліди потоків рідини там, де їх не було лише три

роки тому (Рис. 21.5). Зараз повідомлення про воду на Марсі мають надзвичайно суперечливі інтерпретації.

Одні агентства повідомляють, що «було виявлено декілька водних басейнів», інші – що лише «ознаки води були знайдені в пористих породах, які залягають на глибині кількох сотень метрів під поверхнею», треті – що «вперше можна було знайти сліди присутності води навіть сьогодні на поверхні».

І все ж, зроблені різними космічними апаратами фотографії Марса, показують, що поверхня планети продовжує активно трансформуватися. Так, добре видно схили каньйонів і кратерів з утвореними на них балками та ярами; а біля їх підніжжя спостерігаються характерні конусоподібні відкладення; зазвичай, вони виникають унаслідок розмиву піщаних порід.



Рис. 21.5. Свідчення «прісних» ерозійних водних процесів на підсонячному схилі одного з кратерів на зображені камерою HiRISE з «Mars Reconnaissance Orbiter» 20.09.2007 (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Як і на Землі, все це служить явним доказом водної ерозії. Причому, за багатьма ознаками, вода протікала там зовсім недавно і, скоріше всього, й зараз продовжує свою геологічну дію.

Для дослідження мінералогічного складу гірських порід на орбітальному кораблі "Марс-Експрес" розмістили спектрометр видимого та інфрачервоного діапазонів OMEGA. З його допомогою вдалося зареєструвати багаторічні відкладення водяного льоду навколо Південного полюса планети. Вони розташовані на вершинах осадових порід, віком у десятки мільйонів років. Це вказує на відносно недавній рух льодовиків. Аналіз цих даних показав, що існуючі там відкладення поділяються на водяний лід з

домішкою вуглекислого газу (CO₂), поклади чистого водяного льоду протяжністю в десятки кілометрів, та водяний лід покритий тонким шаром твердого льоду CO₂.

Передбачалося, що в деякі періоди після катастроф, Марс змінювався й через декілька десятиліть чи століть – клімат ставав теплішим та вологішим. Після цього холод знову повернувся. Й так відбувалося до наступного катаклізму.

На користь такого катастрофічного походження існуючих форм рельєфу свідчить те, що в багатьох виявлених річкових долинах практично відсутні притоки, які мали б впадати в основне русло. Тобто, ці річки не були настільки розвинені, як на нашій планеті. А на Марсі вода після кожної катастрофи знову охолоджувалася та замерзала.

Таким чином, нескінченна зима на Марсі лише інколи переривалася короткими періодами, в які випадали теплі дощі та розливалися великі повені.

І теперішні сухі яри є глибокими ровами на схилах, котрі зберігаються протягом тривалого часу. Й окремі елементи поверхні цих схилів є багатими льодом та великою кількістю гідратованих солей. А розчинені перхлорати якраз і можуть стабілізувати рідку воду при температурах лише трохи вище 200 К [36]. На Марсі є й деякі особливості, які змінюються [97] сезонно [20, 90, 95, 96, 104, 131].

Через нестабільність льоду в сучасних умовах на поверхні Марса вважається, що майже весь цей лід повинен бути покритий тонким шаром пилового матеріалу [2, 65].

Також можливо, що деякі приполярні потоки можуть бути зсувами чи лавинами киплячого сухого льоду, змішаного з піском, пилом та камінням. На схилах долини Ніргал видно більше півтора десятків невеликих водостоків довжиною до 1 км (Рис. 21.6, ліворуч). Кожне таке вузьке русло починається приблизно на 100 м нижче краю долини.

Це може вказувати на існування шару, в якому рідина може просочуватися з-під поверхні, виходити на край схилу та утворювати такі канали й віялоподібні утворення на їх дні. Відсутність ударних кратерів на таких схилах вказує на їх геологічну молодість. Такі канали утворені, швидше за все, рідиною, що протікала по його поверхні зовсім недавно.

Представлені на Рис. 21.6 (праворуч) ерозійні елементи також є прикладом багатьох витоків на уступі плоского плато. Наприклад, на одній із фотографій з «Mars Reconnaissance Orbiter» (Рис. 21.5) виявлені сліди потоків рідини там, де їх не було ще три роки тому.

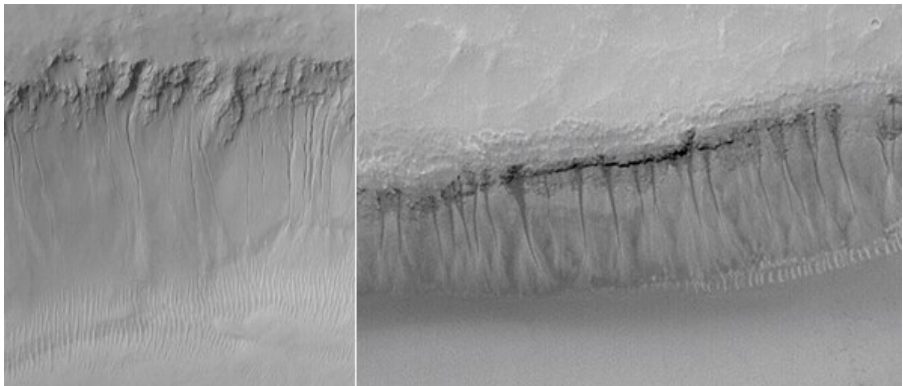


Рис. 21.6. Ліворуч – канали на схилах долини Ніргал на фото від 06.12.1999 з «Mars Global Surveyor». Праворуч – зображення схилу підсонячної долини на Марсі довжиною 1.2 км, зроблене в 2000 році в регіоні Горгонум Хаос (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

22. Рідка вода на поверхні Марса є прямо зараз.

По фото з орбітальних апаратів Марса лише на початку XXI століття на поверхні планети вдалося виявити геологічні структури, які могли утворитися лише під впливом потоків рідини. Причому деякі з цих потоків мають досить молодий за геологічними мірками вік. Так, у деяких промоїнах на підсонячних схилах долин і кратерів були виявлені яскраві відкладення, яких не було лише за кілька років до цього (Рис. 19.2, 19.4).

Наприклад, на багатьох фотографіях з апарата «Марс глобал сурвеєр» отриманих у 2004-2005 рр. містяться яскраві смуги з «гіллястими» закінченнями, характерними для так званих «алювіальних потоків» (Рис. 19.1), яких ще не було на зображеннях тих же місць, отриманих у 1999 і 2001 рр.

Така форма відкладень повністю відповідає перенесенню матеріалу проточною водою. Це означає, що дуже вірогідним стає припущення про наявність води на Марсі [42, 101, 146] зараз, і в рідкій фазі, яка все ще іноді тече по поверхні [12, 57].

На отриманому у 2000 році знімку (Рис. 19.1) показано північну стіну ударного кратера діаметром близько 7 км, розміщеного в південно-західній частині кратера Ньютона, що має приблизно 287 км у діаметрі.

Сьогодні Марс є сухою, холодною планетою, на якій рідка вода не може існувати дуже довго на поверхні. Адже вона негайно почне кипіти, випаровуватися і заморожуватися одночасно [48]. Тому при сходженні селів вода в рідкій формі навряд чи досягає дна схилу. Вона, або випаровується раніше, або ж замерзає.

Ретельні дослідження таких потоків дозволили грубо оцінити мінімальну кількість води, яка може приймати участь у такій потоковій події (Рис. 22.1). Припускаючи, що склад ґрунту подібний до селевих потоків на нашій планеті, і що вода займає понад 10% об'єму, то при товщині покладів ґрунту біля підніжжя потоків у межах 2 м, виходить, що об'єм води у такій події має перевищувати 2500 м³. На схилах Nirgal Vallis видно більше 14 водостоків довжиною майже по 1 км (Рис. 21.6, ліворуч).

Кожна такої вузький канал починається практично в одній і тій же позиції нижче від краю долини приблизно на сотню метрів. Це може вказувати на існування певного шару, в якому рідина – і вірогідніше всього це все ж вода – може просочуватися з під поверхні і виходити на край схилу; далі він формує видимі канали і віялоподібні утворення внизу каналу. Оскільки на цих утвореннях відсутні ударні кратери, то це свідчить про їх геологічну молодість [56].

У роботі [12] представлено дослідження властивостей концентрованих розчинів солей, які мають майже на 70 градусів нижчу температуру замерзання, ніж чиста вода. Проведені експерименти і термодинамічні розрахунки також показали, що температура замерзання деяких розчинів незначно перевищує 200 К. Це дозволило зробити висновок про те, що такі водні розчини цілком можуть залишатися в рідкому стані за існуючих зараз на Марсі умов.

На поверхні Марса й раніше знаходили певні ознаки текучої води. Тобто, колись там існували ріки, постійні водойми, а можливо, й цілий океан. В них могли бути навіть умови для формування життя [62, 85, 111, 115, 117, 122].

Аналіз зібраних місіїю «Mars Reconnaissance Orbiter» (MRO) даних дозволив прийти до висновку, що рідка вода у значній кількості існувала на поверхні Марса 2-2.5 млрд років тому [126]. Це говорить про те, що у минулому Марс мав повноцінну гідросферу і досить потужну атмосферу з тиском біля поверхні понад 0.4 бари [128]. Пізніше вулканічна активність зменшилася [118], клімат планети змінився. Вона втратила значну частину атмосфери та води, перетворившись на холодний світ [132].

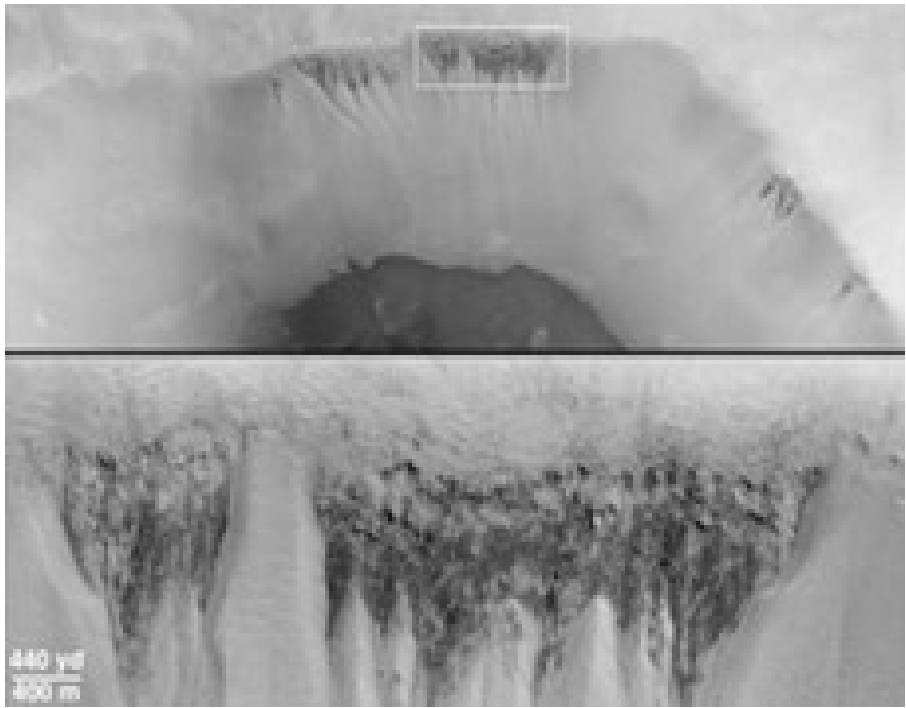


Рис. 22.1. Фото області Noachis Terra отримане 03.1999 з орбіти (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

А зараз на планеті знайшли досить явні ознаки існування води у рідкому вигляді. Знайдена водойма має вигляд озера, яке розташоване під покривом криги біля південного полюса планети [78]. Таку знахідку виявили завдяки радару на борту космічного апарату «Mars Express».

Радари досліджували поверхню планети, надсилаючи сигнали і оцінюючи, яка їхня частина повертається назад. Це дозволило під шаром криги і пилу помітити місця навколо південного полюса планети, де відбивання сигналів від дна були сильнішими, ніж від поверхні. Такий факт і є ознакою наявності там рідкої води на глибині у 1.5 км.

З нинішніми низькими значеннями атмосферного тиску і низькою температурою вода в рідкому стані на поверхні Марса може існувати в деяких западинах лише протягом декількох годин [36]. Адже спостереження з орбітального апарату «MRO» виявили відкладення на обернених до Сонця схилах, яких не було ще кілька років тому (Рис. 22.1).

Ці потоки утворюються при порівняно низьких температурах і тому не можуть бути утворені звичайною водою через невідповідність фізичних умов. Але вони мають можливість бути утвореними при таненні твердого вуглекислого газу теплим літом з утворенням потоків рідкого вуглекислого газу, або ж із дуже солоної води [11]. Такі сухі яри і глибокі канави на схилах зберігаються протягом тривалого часу.

Зі спектрометром «CRISM» навіть проводилися прямі спостереження водних соляних розчинів, які з'являлися одночасно з утворенням цих ліній на схилах. Такі спостереження у 2015 році підтвердили, що ці лінії утворюються саме потоком рідких розсолів по ґрунтах. Виявилося, що вони містять гідратовані хлорати та перхлорати (ClO_4^-) з молекулами рідкої води [36]. Особливу увагу приділяли розчину, до складу

якого входить сульфат тривалентного заліза $Fe_2(SO_4)_3$, виявлений у деяких геологічних формаціях планети.

Такі потоки течуть вниз марсіанським літом, коли температура стає навіть вищою від 250 К. Чиста рідка вода є дуже нестійкою на поверхні планети, оскільки піддається замерзанню, випаровуванню та кипінню. Тому рідка вода може існувати на поверхні Марса тільки внаслідок утворення розсолів. Про це свідчить знайдена велика кількість гідратованих солей [36]. Склад марсіанського реголіту досить надійно було визначено при використанні посадкового модуля «Фенікс». І його можна використовувати для обмеження моделей щоб надати достатньо точне уявлення про те, як насправді можуть утворюватися розсоли на планеті [11, 36].

Показаний на Рис. 19.5 схил розташований у південній півкулі Марса – приблизно на 37° широти, де денні температури можуть інколи перевищувати 0°C. Тому наявність там води в рідкому вигляді також цілком можлива. А спостереження з радарними апаратами «SHARAD» і «MARSIS» підтвердили, що окремі елементи поверхні схилів багаті водним льодом.

Через нестабільність льоду за сучасних умов на поверхні Марса, вважається, що майже весь цей лід має бути покритий тонким шаром кам'янистого або пилового матеріалу [61, 63]. Еродовані особливості, розміщені на обриві рівнинного плато (Рис. 21.6, праворуч), є прикладом багатьох водостоків.

Як видно, шар, з якого виходять водостоки, мав достатньо часу для того, щоб сформувати виступ нижче твердшого шару скелі. У місці порівняно більших водостоків сформувалися і більші осипання у твердшому шарі ґрунту вище за виступ. Нижче від можливого водоносного шару помітно темні вузькі канали, по яких і відбувалося сходження селів.

Темний колір каналів на цьому зображенні свідчить, що вода просочилася із землі і рухалася по схилу донизу зовсім недавно. Адже досить помітні контрасти між темними і світлими областями навряд чи змогли б підтримуватися на Марсі протягом тривалого часу, тому що пил досить швидко покрив би темнішу поверхню і зменшив би відмінності у її яскравості [132]. Товщина залягання такого водоносного шару у даному місці Марса не перевищує 100 м.

У серпні 2011 року НАСА оголосило про виявлення поточних сезонних [96-98, 107, 113] змін на крутих схилах під скелястими відслоненнями поблизу кратерів у південній півкулі. Було помічено, що ці темні смуги ростуть вниз по схилу протягом найтеплішої частини марсіанського літа, а потім поступово зникають протягом решти року, повторюючись циклічно між роками. Ці сліди відповідають тому, що солоня вода тече вниз по схилу, а потім випаровується, можливо, залишаючи якийсь осад [100, 144].

Дані нейтронного спектрометра з орбітального апарату «Mars Odyssey», отримані протягом десятиліття, опубліковані в грудні 2017 року. Вони показали, що вода в рідкому стані на сучасному Марсі може бути ще й слідами вологи з атмосфери.

Це вказує на те, що отримані протягом останнього часу спостережені дані доказують, що і сьогодні Марс являється геологічно активним тілом на небосхилі. Активність потоків зосереджена в середніх широтах. А знайдені ерозійними потоками структури, зазвичай, є не старшими від кількох десятків або навіть кількох одиниць років; і вони являються слідами рідини, яка просочувалася із-під шару з вічною мерзлотою.

Характерним є те, що усі сліди такої водноселевої ерозії було виявлено на північних схилах у глибоких каньйонах в північній півкулі та на південних схилах – південної півкулі; тобто саме в тих місцях, у котрих атмосферний тиск ненадовго, проте дозволяє сезонно зберегти воду від моментального холодного закипання. Тобто, вода на цій планеті суттєво впливає на формування рельєфу її поверхні. І запаси цієї води мають бути достатньо великими.

23. А може це не вода?

Повідомлення про воду на Марсі з'являються в укрain суперечливих інтерпретаціях [102].

Одні спостерігачі оголошують, що на глибині 1.5 км під південною полярною шапкою «виявлено декілька водних басейнів» [86],

інші – що знайдено лише «ознаки води в пористих скельних породах, котрі залягають на глибині декількох сотень метрів під поверхнею»,

треті – що «вперше вдалося виявити сезонні [91, 117, 132] сліди наявності рідини і в наші дні на поверхні» [2].

На деяких фотографіях Марса, отриманих різними космічними апаратами, видно, що поверхня планети і тепер активно перетворюється [109, 111, 132].

Так, чітко видно схили великих каньйонів і метеоритних кратерів з утвореними на них проміїнами і ярами; а біля їхнього підніжжя знайдено характерні конусоподібні наноси, що зазвичай з'являються в результаті розмиву піщаних порід [41]. Для геологів все це служить явним свідченням водної ерозії (Рис. 23.1). Причому, згідно багатьох ознак, вода була там або зовсім недавно, або ж, можливо, що й донині здійснює свій геологічний вплив.

Нагадаємо, що річкові русла на Марсі було виявлено ще в 70-х роках минулого століття [64, 101] із порівняння наземних [62, 63, 138] і космічних спостережень.

Нова спостережна інформація показує, що колишній марсіанський океан за всю геологічну історію планети при некатастрофічних подіях мав би втратити всього декілька сантиметрів. Тому ряд дослідників припускали, що в періоди після катастрофічних змін, викликаних, наприклад активізацією вулканічної діяльності [122], Марс змінювався і протягом кількох десятиліть (чи століть) клімат ставав все теплішим і вологішим [131]; потім холод знову повертався, і так – до наступного катаклізму.

Доводом на користь катастрофічного походження наявного рельєфу є те, що більшість із виявлених річкових долин практично не мають ознак притоків, які впадають в головне русло. Це свідчить про те, що річки не були такими розвиненими, як земні.

Марс після закінчення кожної катастрофи знову неминуче охолоджувався, і вода знову замерзала. Такі холодні періоди на Марсі були дуже тривалими і порушувалася тільки короткочасними періодами з теплими дощами і великими повеннями.

У даний час умови на поверхні Марса такі, що вода в рідкому стані там існувати не може: вона замерзне й швидко випарується в холодній і розрідженій атмосфері [96, 100]. Але в минулому клімат там був іншим, таким що навіть рідка вода могла текти по поверхні планети [140], і навіть могли зародитися примітивні форми життя [85, 87, 113, 118, 129]. Потoki, які сезонно [36, 97, 98] утворюються на обернених до Сонця схилах, при порівняно низьких температурах не можуть бути утворені звичайною водою через невідповідність фізичних умов. І тоді є шанс, що вони утворені при таненні твердого вуглекислого газу теплим літом з утворенням потоків рідкого вуглекислого газу, або ж дуже солоної води [40, 43].

Ці канали утворені стіканням забрудненої рідини (селю) схилом униз від області просочування (Рис. 23.1). Хоча в [60] запропоновано, що приполярні потоки можуть бути ще й обвалами або лавинами киплячого сухого льоду, які несуть із собою пісок, пил [78, 146] і каміння (Рис. 19.1). Адже марсіанською весною по освітлених сонцем схилах приполярних каньйонів, заповнених кригою і снігом з діоксиду вуглецю, при температурі всього 143 К час від часу також з'являються свіжі потоки рідини. Оскільки вода при таких температурах навряд чи змогла б текти, то найімовірнішим є те, що це могли бути потоки селів на основі розмерзлого діоксиду вуглецю. В рідкому стані ця сполука існувати не може, а відразу ж переходить із твердого до газоподібного стану шляхом сублимації.

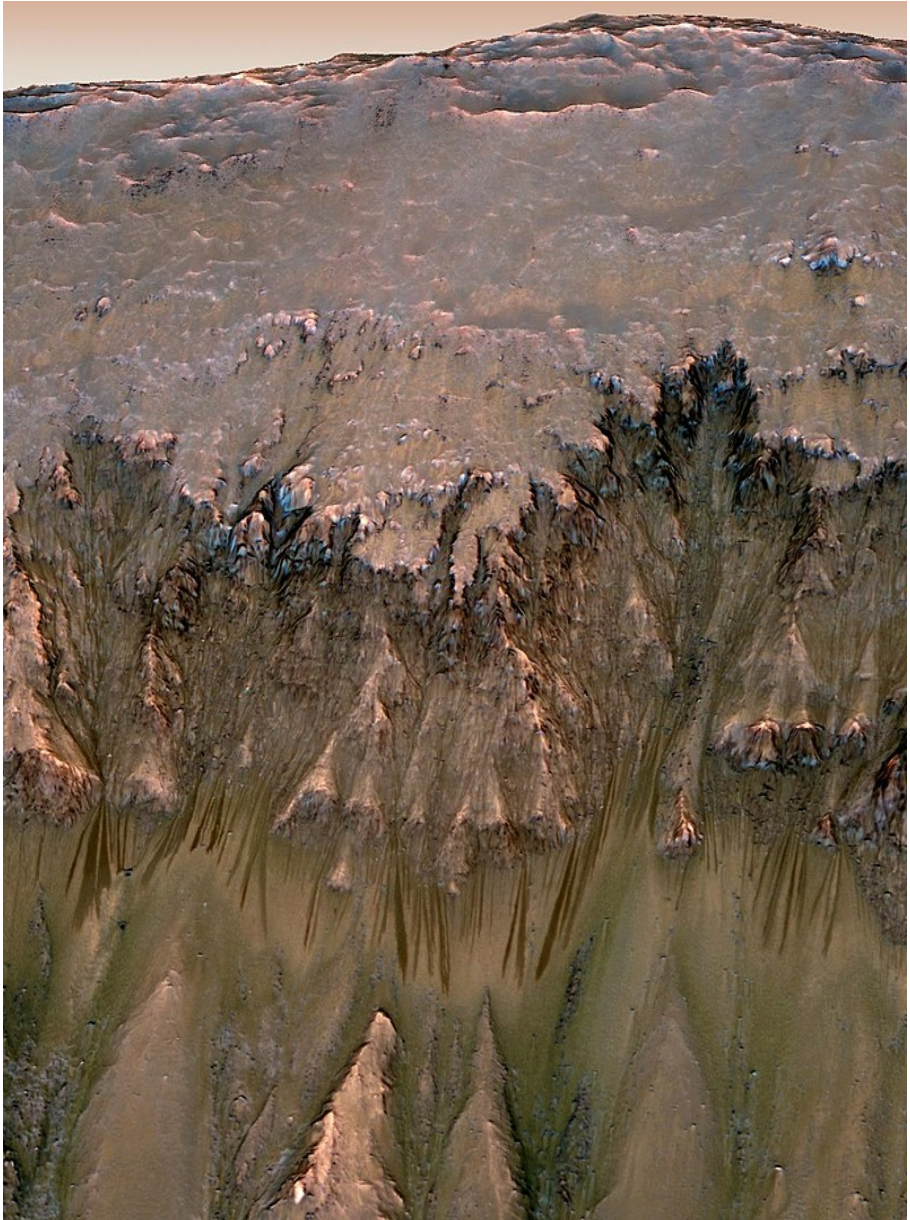


Рис. 23.1. Потіки на схилі в кратері Ньютон під час теплого сезону (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA14479>).

Як видно з Рис. (19.1, 21.6, 23.1, 23.2, 1–4), вони виходять з шару під виступом нижче твердшого шару скелі. У місці з більшими водотоками утворилися більші

осипання, селі тощо. Те, що тут немає ударних кратерів, свідчить на користь їхньої геологічної юності.

Представлені на Рис. 21.6 еродовані особливості є прикладом багатьох водостоків. Вони розміщуються на обриві рівнинного плато. Як видно, шар, з якого виходять водостоки, мав достатньо часу для того, щоб сформувати виступ нижче твердішого шару скелі. У місці порівняно більших стоків рідини сформувалися і більші осипання у твердішому ґрунті вище за виступ.

Нижче від можливого водоносного шару помітно темні вузькі канали, по яких, можливо, і відбувалося сходження селів, що рухалася по схилу донизу зовсім недавно. Адже досить помітними є контрасти між світлими й темними областями. І навряд чи вони могли б підтримуватися на поверхні планети протягом досить тривалого часу. Тому що пил досить швидко покрив би темнішу поверхню і зменшив би відмінності у її яскравості.

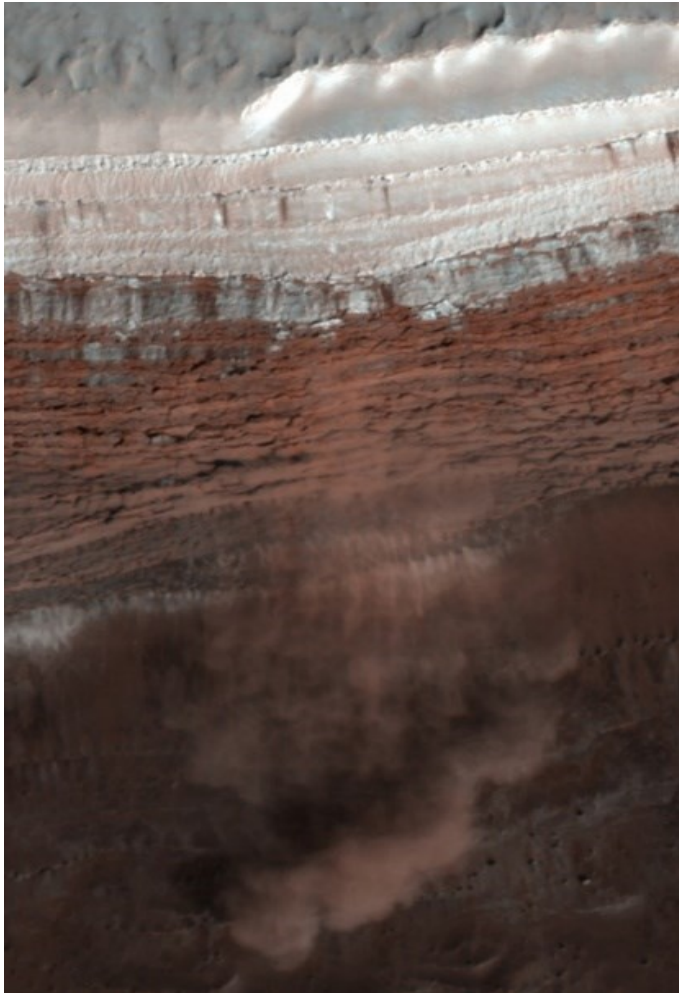


Рис. 23.2. Фото сходження лавини на Марсі (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Товщина залягання такого «водоносного» шару у даному місці Марса є меншим від 100 м.

Наприклад, на одній з фотографій, переданих на Землю апаратом «Марс глобал сервейор» (Рис. 21.5), були виявлені ерозійні сліди там, де трьома роками раніше їх не було. Цілком можливо, що потоки, які вирізають яр, є сухими зернами, або, можливо, вуглекислим газом, який тане теплим літом, утворюватиме рідкий вуглекислий газ, який потім утворюватиме яри.

Дані нейтронного спектрометра з орбітального апарату «Mars Odyssey», що були опубліковані в 2017 році, не показали серйозних доказів впливу води на утворювану ерозію. Тому було висунуто гіпотезу про існування сухих гранульованих потоків.

24. Лід на поверхні Марса.

Основні поклади марсіанського водяного льоду знайдено у північній полярній шапці [101, 146]. Дещо менші його багаторічні поклади були зареєстровані у південній полярній шапці. А спостереження з гама-спектрометром вказали на присутність значної кількості водяного льоду, що знаходиться під поверхнею Марса на середніх широтах планети, і навіть в його екваторіальній області [60, 100]. Тобто, льодовикові структури були знайдені на багатьох ділянках Марса, або ж були отримані докази того, що вони колись там були присутні [127].

Зараз у цих місцях лід є захищеним від сублімації покриттями ізоляційної породи, пилом чи уламками скель [62, 64, 144]. Також було помічено, що поклади льоду зазвичай пов'язані з еродованою місцевістю і з багатьма вулканами, такими як, наприклад, Павоніс, Арсія, Олімп та інші. А ще льодовики були знайдені у декількох великих марсіанських кратерах на середніх широтах.

Деякі, подібні до льодовиків елементи поверхні Марса можуть бути невеликими льодовиками, які пов'язані з ярами на стінках невеликих кратерів [118]. А доволі плоскі відкладення в багатьох долинах, ймовірно, є вкритими шаром щаблю та інших ізоляційних порід льодовики, які знаходяться на дні більшості каналів [102].

Дуже низькі температури на Марсі роблять льодовики холодними; вони з часом промерзають до самого дна і тому не мають можливості ковзати. По цій причині такі намерзлі особливості повторюють основну топографію досліджуваної поверхні [91].

А нагромадження доволі свіжих уламків на поверхні таких льодовиків вказують переважний напрямок переміщення льоду. Інколи лід відразу випаровується не танучи; і тоді в таких місцях можуть залишатися порожнини під поверхнею. З часом матеріал, що лежить ближче до поверхні, може потім зруйнуватися, утворюючи провали в такі порожнини.

На переданому космічним апаратом «Марс Експрес» на початку лютого 2006 р. зображенні рівнини *Vastitas Borealis*, на широті 70.5°N, на дні кратера діаметром 35 км і глибиною 2 км було виявлено достатньо чистий круглий крижаний диск товщиною до 200 м (Рис. 24.1).

На внутрішній стороні цього кратера у верхній правій частині було видно іній. Значення температури й тиску у цьому районі такі, що там не могло бути твердого діоксиду вуглецю.

Тому ці поклади віднесли на рахунок водяного льоду, який вже тривалий час не випаровується. Вал цього кратера має висоту до 300 м, і тому закриває доступ прямого сонячного світла до дна кратера.

Отже, вода на планеті міститься ще й у вигляді відкритих покладів льоду і снігу. Докладні знімки поверхні Марса з орбітальної станції «Марс Одиссей», дали змогу виявити відразу декілька «живих» льодовиків у середніх широтах планети.

На наведеному на Рис. 20.5 знімку можна відмітити досить цікаву обставину, коли лінії уступів у долинах марсіанських льодовиків виглядають (на відміну від таких утворень на Землі) практично непошкодженими і не розмитими.

Це можна пояснити тим, що на Марсі льодовики, в основному, не танули, як на Землі, а відразу ж перетворювалися в пару через дуже розріджену марсіанську атмосферу (сублімували).

Деякі особливості рельєфу явно нагадують вигладжені льодовиками ділянки (Рис. 24.2, справа, внизу).

Судячи з хорошого збереження цих форм, які не встигли ні зруйнуватися, ні покритися наступними нашаруваннями, вони мають відносно недавнє походження.

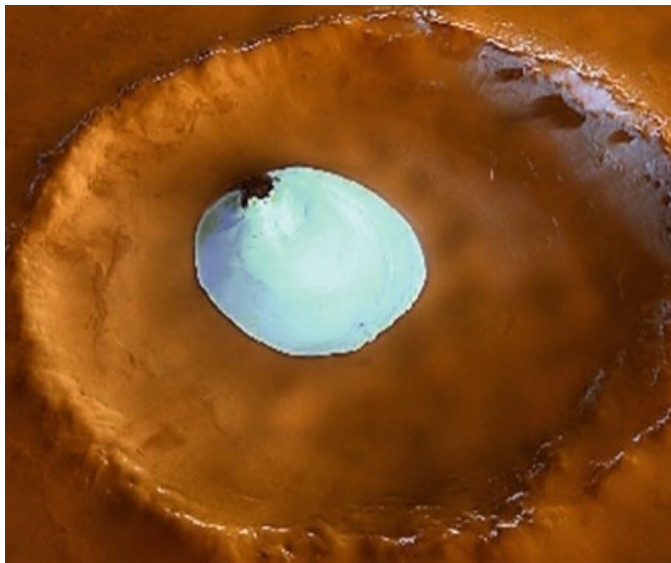


Рис. 24.1. Водяний лід та іній у кратері на поверхні Марса (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

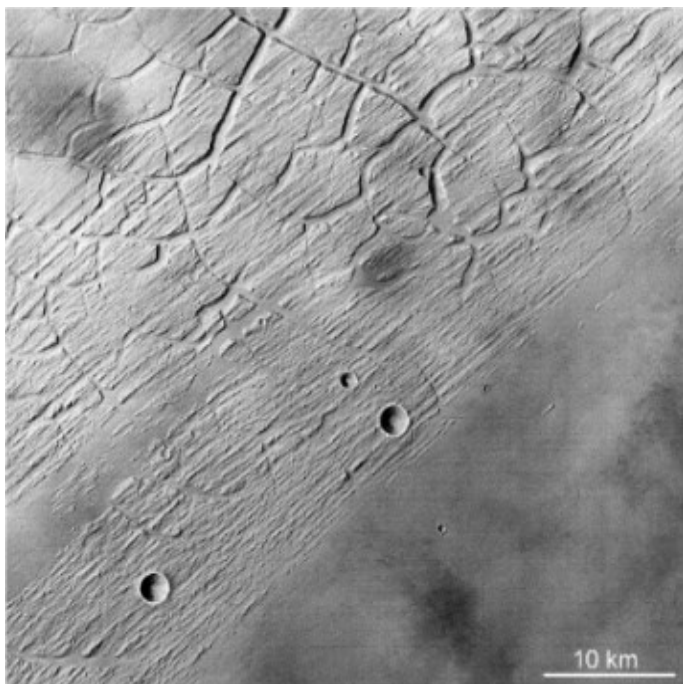


Рис. 24.2. Особливості рельєфу, що нагадують вигладжені льодовиками ділянки (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

А на початку осені 2000 року на переданих станцією «Марс глобал сурвеєр» фотознімках гірського масиву Марса було зафіксоване, можливо, величезне крижане озеро; під його льодом може бути й рідка вода (Рис. 16.1).

Аналіз отриманих з орбітальних апаратів Марса даних, виявив, що сезонно [20, 87, 96, 97, 105, 113, 131], марсіанською весною по освітлених Сонцем схилах приполярних каньйонів, вкритих зверху льодом і снігом з двоокису вуглецю, при температурі близько 143 К починають з'являтися свіжі потоки за участю рідини. Вода при таких температурах навряд чи змогла б текти. Швидше всього, там можуть протікати селеві потоки на основі двоокису вуглецю.

Нагадаємо, що на Марсі рідкий двоокис вуглецю також існувати не може, оскільки через розріджену атмосферу він відразу ж переходить безпосередньо з твердого в газоподібний стан шляхом сублімації [129, 132]. Тому в [43] пропонується, що ці приполярні «потоки», найімовірніше, можуть бути обвалами, або лавинами з «киплячого» сухого льоду, що несе з собою пісок, пил і камені (див, наприклад, Рис. 23.2).

Вважають, що приблизно 3.8 млрд років тому Марс мав щільну атмосферу та вищу температуру поверхні [57, 126]. Це дозволяло перебувати на поверхні величезній кількості рідкої води, включаючи, можливо, й океан. Існують вказівки на те, що протягом останніх років вода текла поверхнею Марса протягом коротких періодів часу в різні проміжки часу.

Тобто, поверхня Марса періодично була теплою і вологою, і могла бути гостинною для мікробного життя. Проте нинішнє середовище на поверхні є сухим і холодним.

Ймовірно, це є непереборною перешкодою для живих форм. Крім того, на Марсі немає густої атмосфери, озонового шару та магнітного поля. І це дозволяє сонячному та космічному випромінюванню безперешкодно потрапляти до поверхні.

Шкідливий вплив іонізуючого випромінювання на клітинну структуру є одним із основних факторів, що обмежують виживання життєвих форм на поверхні. Тому найбільш підходящими потенційними місцями щодо виявлення життєвих форм на Марсі є підземні середовища.

Чергові свідчення водного минулого Марса появилось при спостереженнях каньйону Sandor Chasma (Рис. 20.3) з просторовою роздільною здатністю краще 1 м. На зображеннях стали видимі дуже цікаві геологічні деталі. Так, у роботі [71] представлені дані, які дозволили знайти тонкі смужки світлого матеріалу уздовж ліній розломів, що тягнуться на декілька кілометрів (Рис. 20.4).

Вважалося, що спочатку це була «труба», по якій текла рідина (вода, рідкий вуглекислий газ з водою, або без неї) з розчиненими в ній речовинами. Речовини з потоку випадали в осад і накопичуючись на стінках «трубопроводу». Через сотні мільйонів років ерозія дуже сильно змінила цю місцевість. І те, що було під поверхнею, знаходиться тепер на поверхні. Це викликало появу на досить темному фоні світлих смужок. Ці глибокі підземні області могли бути своєрідними оазами для різноманітної біологічної діяльності [71]. Тому вони (разом з ділянками Марса, покритими глинами) можуть бути ще одним перспективним місцем для пошуку слідів життя [85, 86, 111, 115, 117]. Тим більше, що подібні смужки уздовж багатьох тріщин та розломів на поверхні вдалося виявити не лише на зображеннях Sandor Chasma, а й в деяких інших регіонах планети.

Подекуди на поверхні планети знайдені багатощарові породи, схожі на осадові породи на нашій планеті, які зазвичай залишилися після відступів морської води. Серед виявлених на поверхні Марса утворень, особливої уваги заслуговують русло-подібні канали і так звані меандрові долини. Їхній зовнішній вигляд і наявність притоків навряд чи можна пояснити інакше, ніж запропонувавши, що це висохлі русла річок.

Дослідження інформації, переданої станціями «Mars Global Surveyor» і «Mars Reconnaissance Orbiter» в [25], показали що утворення тріщин у марсіанських кратерах має бути пов'язаним з поступовим випаровуванням води, що містилася там раніше.

Аналіз структури внутрішньої поверхні 266 ударних кратерів показав, що тріщини на їх дні багато разів перетиналися, утворюючи на поверхні окремі області з розмірами до 250 м. При цьому середній розмір таких областей складав 70-140 м; а ширина тріщин на поверхні змінювалася від 1 до 10 м. Такі багатокутники (Рис. 15.1), оточені тріщинами з усіх боків, спостерігалися й раніше. Проте до даної роботи їх формування пов'язували із стисненням мерзлих марсіанських гірських порід. В роботі [25] було запропоновано аналітичну модель утворення таких багатокутників з тріщинами, яка дозволила з'ясувати, що за існуючих на Марсі умов при тепловому стисненні порід зможуть формуватися тільки багатокутники з діаметром до 65 м.

Виявилось, що глибина спостережуваних тріщин і розміри багатокутників повністю відповідали дії процесу випаровування води, який, наприклад, викликає розтріскування дна висохлого озера на Землі.

Отриманий результат дає підстави говорити про те, що декілька мільярдів років тому, на поверхні Марса було багато води, яка могла збиратися в кратерах. Ретельні дослідження багатьох кратерів дозволили отримати висновок, що формування тріщин у деяких кратерах північної півкулі Марса завершилося набагато пізніше. За певних умов, при падінні метеорита, лід, що знаходився під поверхнею планети, танув і це могло привести до утворення озера з рідкої води; потім воно покривалося товстим шаром замерзлого льоду.

25. Заморжена вода в ґрунті Марса.

Раніше лише припускали, що деякі регіони на поверхні Марса виглядають як гляціальні регіони на Землі [57]. За аналогією з цими наземними особливостями багато років стверджували, що і на Марсі вони можуть бути регіонами вічної мерзлоти. Це означало, що замерзла вода лежить прямо під поверхнею планети в товщі ґрунту.

Загальною рисою для регіонів на високих широтах є своєрідні візерунки смуг та багатокутників на рівнинних ділянках поверхні. На Землі такі форми зумовлені замерзанням і відтаванням ґрунту. Дослідження в [25] показали, що утворення тріщин у марсіанських кратерах повинне бути пов'язане з поступовим випаровуванням води, що містилася там раніше.

Тріщини на їх дні багато разів перетиналися, утворюючи на поверхні окремі області з середнім розміром 70-140 м; ширина тріщин у ґрунті змінювалася від 1 до 10 м. В [25] запропоновано аналітичну модель їх утворення, яка дозволила показати, що за існуючих на Марсі умов при тепловому стисненні порід зможуть формуватися тільки багатокутники з діаметром до 65 м.

А глибина спостережуваних тріщин і розміри багатокутників повністю відповідали дії процесу випаровування води, який, наприклад, викликає розтріскування дна висохлого озера на Землі. Це вказує на те, що можливо, декілька мільярдів років тому, на поверхні Марса було доволі багато води, яка могла збиратися і в деяких кратерах.

Зараз весь Марс скутий вічною мерзлотою, товщина якої за різними даними на екваторі досягає одного кілометра, а до полюсів – збільшується до шести. Проте виразні яри-проміїни усередині деяких крупних кратерів говорять про періодичний вихід рідкої води з розталого шару вічної мерзлоти.

В інших місцях на поверхні Марсі також знайшли деякі докази існування значних кількостей замерзлої води під поверхнею.

Цими доказами є певне округлення гострих топографічних особливостей рельєфу. Спостережні вимірювання з гамма-спектрометрами, установленими на орбітальному апараті «Mars Odyssey» та на посадковому модулі «Phoenix» підтвердили наявність водяного льоду дуже близько до поверхні планети [127].

Поперечний розріз підземного водяного льоду показано на крутому схилі, який виглядає яскраво-блакитним на Рис. 25.1.

Ширина даної ділянки становить кілька сотень метрів; а уступ опускається майже на 130 метрів від рівня поверхні [22].

У 2017 р. за допомогою камери “HiRISE” на борту «MRO» вдалося виявити принаймні вісім схилів, що розмиваються, і на яких видно відкриті водяні крижані покрови завтовшки 100 м. Вони, зазвичай вкриті шаром ґрунту товщиною в 1-2 м [148]. Ці шари льоду зберігають підказки про кліматичну [13, 96, 113,] історію Марса [126] та роблять замерзлу воду доступною для майбутніх дослідників [64, 94].

Такі відкладення могли бути залишками льодовиків, які існували всього кілька мільйонів років тому, коли вісь обертання планети та її орбіта були трохи іншими. Дослідження в 2019 році виявили, що водяний лід існує на широтах близько 35°N. І добування водяного льоду в тих умовах не потребує складного обладнання [77].

Дослідження Марса космічними апаратами «Mars Global Surveyor» та «Mars Odyssey» [100] довели, що величезна кількість льоду знаходиться під поверхневим шаром на глибині не більше 5 м, а можливо й вода у рідкому стані [56]. Один із механізмів утворення такої криги пов'язували з глобальними пиловими бурями [62, 64, 65, 109, 132].

Вважалося, що пил осідає з атмосфери і далі піднімається при сезонному [20, 57, 87, 105] переміщенні вуглекислого газу і води та накопичується в шаруватих

відкладеннях у Полярних областях (Рис. 4.1). Підтвердженням цього вважали спостережувану регулярність утворення шаруватості у приполярних районах.

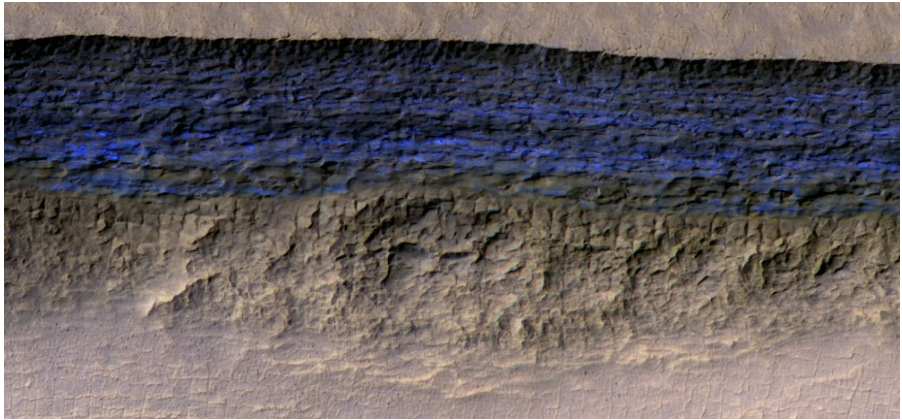


Рис. 25.1. Поперечний переріз крутого схилу з шарами льоду, який показаний блакитним кольором (зображення з камери «HiRISE»)
(https://d2pn8kiwq2w21t.cloudfront.net/original_images/imagesmro20180111PIA22077-16.jpg).

Вона могла свідчити про періодичні зміни в їх утворенні, що є відображенням кліматичних змін, зумовлених ексцентриситетом марсіанської орбіти. Кожного наступного марсіанського року за рахунок літнього випаровування тонкого покриву з вуглекислого газу відкриваються наявні там шари замерзлої води.

За даними спектроскопії з марсоходів «Спіріт» і «Оппорт'юніті» вдалося визначити склад різних сполук заліза на поверхні Марса. Вони також вказали на можливість наявності води на планеті в минулому [100, 146].

За цими ж даними вперше було виявлено сульфати, карбонати, які входять до складу восьми десятків мінералів на Землі, та які утворюються лише за наявності води та вуглекислого газу. Це підкріпило ту гіпотезу, згідно якої у далекому минулому й протягом досить тривалого часу планету Марс укривали великі водойми із значними запасами рідкої води. Цього часу було достатньо навіть для розвитку певних життєвих форм [85, 86, 111, 115, 117, 121, 122].

Про наявність підповерхневого льоду свідчить приклад спостережуваної сублімації, коли твердий лід одразу перетворюється на пару, мінаючи рідкий стан. Лід, який знайшов апарат «Phoenix», лежав на глибині 7-8 см під шаром буро-рудого ґрунту, недалеко від межі полярної шапки, котра суттєво зменшилася з приходом заполярного літа. Розрахунки показали, що вода могла бути і на широтах близько 60°, але на глибині понад 20 см.

Зовсім недавно знайдено свіжі кратери [56, 118, 119, 123, 145], які утворюються після падіння метеоритів [6]. Світлі плями навколо них з часом зменшувалися в розмірах. А їхні інфрачервоні спектри чітко вказували на присутність води. Швидкість випаровування речовини засвідчила, що лід є дуже чистим, і щонайменше на 99% складається з води.

На отриманих камерою «HiRISE» зображень околиць рівнин Аркадія й Утопія в п'яти різних регіонах північної півкулі Марса, протягом року було зареєстровано понад 90 свіжих кратерів розмірами від 1 до 12 м та глибиною до 2.5 м.

Всі вони підтвердили присутність там дуже чистого і яскравого льоду. Через декілька місяців увесь цей лід, як і запаси льоду у викопаній «Феніксом» траншеї, були частково випарувані. Розподіл світлих плям всередині та навколо ударних кратерів показує факт, що верхня границя достатньо чистого шару криги в місцях падіння метеороїдних тіл знаходиться на глибинах 10-35 см. А його товщина складає від декількох сантиметрів до півметра, а, можливо, й більше. І якщо раніше вважалося, що лід накопичується під поверхнею між частинками ґрунту.

Тобто, це мала бути суміш гязі й льоду у відношенні 50:50. Але ретельні дослідження прямих зображень і аналіз спектральних даних з'ясували, що насправді суміш складається лише з 1% гязі і 99% водяного льоду.

Така чистота льоду поки що незрозуміла. За підрахунками, для пояснення появи льоду на низьких широтах, вологість марсіанської атмосфери на момент утворення крижаного шару мала бути в півтора рази вищою, ніж зараз.

І тут не йдеться про яесь дуже далеке «вологе минуле» Марса мільярди років тому. Такий лід утворився на Марсі так же, як і кришталики льоду під поверхнею на Землі при значному промерзанні ґрунту. І лід є не лише на полюсах, але й поблизу екватора.

Наявність льоду поблизу екватора пояснюється дуже низькою теплопровідністю ґрунту [91, 144], через яку за добу ґрунт прогрівається лише на дуже невелику глибину. Причому останні знахідки говорять, що вода на планеті була або зовсім недавно, або залишається там порівняно неглибоко і зараз. На схилах Nirgal Vallis видно більше 14 невеликих водостоків довжиною майже по 1 км (Рис. 21.6, ліворуч). Кожен такий вузький канал починається практично в одній і тій же позиції нижче від краю долини приблизно на 100 м.

Це також може вказувати на існування певного шару, в якому рідина – і вірогідніше всього це все ж вода – може просочуватися з під поверхні і виходити на край схилу для того, щоб сформувати ці канали і віялоподібні утворення внизу каналу. Ці дюни, віяла і канали не мають ударних кратерів на них. Це свідчить про геологічну молодість цих особливостей з віком менше декількох мільйонів років, а можливо й декількох тижнів, чи навіть днів.

Пошук води на Марсі визнаний одним з найважливіших завдань усіх марсіанських експедицій. Крім цього, виявлення джерел води на поверхні планети мало б і важливе значення для астробіологів. Адже здатність умов на планеті підтримувати життєві форми надало б значну підтримку ентузіастам, які закликають уряди багатьох країн всерйоз задуматися щодо космічної експансії. Якщо на планеті Марс дійсно існують досяжні джерела водяних запасів, то здійснити подібні програми стало б значно простіше.

26. Темні отвори на поверхні Марса є провалами до вулканічних печер.

Печери на Землі [135] ділять на вулканічні, карстові, тектонічні, ерозійні та льодовикові. Печери також знайдені на Місяці і на Марсі. Передбачається, що на Місяці вони мають вулканічне походження [91, 119, 145]; а на Марсі [141], швидше за все, є і вулканічні та, можливо, льодовикові; потім вони обрушилися провалом всередину. На Землі – найбільше карстових печер.

Карстові печери утворюються внаслідок розчинення порід водою. Тому вони зустрічаються тільки там, де залягають розчинні породи: вапняк, мармур, доломіт, крейда, гіпс та сіль. Вапняк, а тим більше мармур, чистою дистильованою водою розчиняються дуже погано. Розчинність підвищується у кілька разів, якщо у воді присутній розчинений вуглекислий газ [142].

Вапняк розчиняється слабкіше порівняно, скажімо, з гіпсом або із сіллю. Але виявляється, що цей факт позитивно позначається на утворенні довгих печер. Адже гіпсові і соляні печери не лише швидше утворюються, але й швидше руйнуються. Д

ля утворення такої печери необхідна достатня кількість водних опадів [101] і підходяща форма рельєфу. Тоді опади потраплятимуть у печеру з більшої площі поверхні. А вхід до печери повинен розташовуватися вище за те місце, куди зливаються підземні води тощо.

Тектонічні печери можуть виникати у будь-яких породах внаслідок утворення тектонічних розломів. Як правило, такі печери зустрічаються на схилах глибоко врізаних у плоскогір'я річкових долин, за умови що величезні масиви породи відколюються від країв, утворюючи тріщини і просідання. Такі тріщини, зазвичай, сходяться клином на глибині. Дещо пізніше вони можуть завалюватися пухкими відкладеннями із поверхні гірського масиву. Проте іноді вони можуть утворювати досить глибокі вертикальні печери глибиною до 100 м.

Ерозійні печери мають утворюватися у нерозчинних породах при механічній ерозії внаслідок впливу проточної води, котра містить частинки твердого матеріалу. На Землі такі печери часто утворюються на березі морів. Вони, зазвичай, мають невеликі розміри. Можливе утворення таких печер під впливом струмків, що протікають по тектонічних тріщинах, які опускаються під землю.

Льодовикові печери утворюються в льодовиках під впливом талої води.

Розтала вода проходить по тілу льодовика по великих тріщинах і по їх розгалуженнях, утворюючи ходи, висотою до кількох метрів. Довжина такого типу печер може досягати декількох сотень метрів, а глибина – від сотні метрів і більше.

Вулканічні печери з'являються при виверженнях вулканів. Потік лави, остигаючи, покривається твердою корою, утворюючи лавові трубки; а в їх середині тече розплавлена порода ще протягом певного часу. Після того як виверження закінчилося, лава витікає з трубок у найнижчому місці.

А в середині лавової трубки залишається порожнина. Оскільки лавові печери залягають на схилах вулканів близько до поверхні, то їх верхня частина часто обвалюється. На Землі лавові печери можуть досягати до 70 км у довжину і до 1100 м глибиною.

Майже половина поверхні Марса [136, 137] вкрита старими вулканічними [130] і ударними кратерами та гірськими масивами, а друга половина – молодими кратерами та рівнинними відкладеннями (Рис. 3.1). За віком кратери поділяють на старі та молоді [140]. У південних районах Марса кратерних утворень знайдено більше, ніж у північних.

Лише південні низинні рівнини Hellas Planitia [85, 117, 118] and Argyre Planitia, що розташовані в середині гігантських кільцевих структур, характеризуються мінімальною густиною кратерів.

Більшість вулканічних кратерів [123, 127] розташовані на вершинах куполоподібних підвищень. Характерними представниками кратерів вулканічного походження є великі кратери, розташовані на вершинах чотирьох найвищих на Марсі гір: Olympus, Argya, Pavonis and Askraeus. У переважній більшості великі кратери покриті дрібнішими кратерними утвореннями.

У 2004 році на зроблених з низькою просторовою роздільною здатністю фотографіях вулканічного плато Tharsis, отриманих камерою «THEMIS» космічного апарату «Марс Одісей», вперше вдалося побачити сім загадкових темних провалів.

Саме на цьому марсіанському плато знаходяться і згадувані вище найбільші у Сонячній системі вулкани. І якраз на схилах вулканічної гори Argya вдалося помітити ці темні округлі плями. Їх назвали «Сім сестер». Вони отримали такі жіночі імена: Венді, Ені, Дена, Хлоя, Еббі, Ніккі та Джінн.

Одна з них показана на Рис. 26.1 (ліворуч). Пізніше вивчення показали, що ці темні плями на поверхні Марса є провалами, своєрідними кам'янистими колодязями.

Для того, щоб пояснити їх природу було запропоновано, що дані плями є вхідними отворами в глибокі вулканічні печери під поверхнею планети. Тобто, дуже можливо, що вони, по аналогії із деякими земними вулканами, є провалами в стелі великих печер. Зображення на Рис. 26.1 отримали у травні 2007 р. камерою High Resolution Imaging Science Experiment (HIRISE) з космічного апарату «Mars Reconnaissance Orbiter».

Показаний отвір є глибоким, і його дно майже не освітлюється Сонцем.

Пізніше були отримані зображення ще одного провалу на схилах вулкану, названого Джінн. На перших фотографіях (Рис. 26.1, посередині) він виглядає чорною плямою з розміром 150×157 м. Там не видно жодних натяків на дно та на зовнішній вал по його периметру. Нові зображення цього ж провалу Джінн вдалося отримати в час, коли Сонце в районі зйомки почало рухатися до заходу.

На представленому на Рис. 26.1 (праворуч) знімку вже добре видно деякі деталі на стінках усередині об'єкту, освітлених косими сонячними променями з її східного боку. Ці стінки йдуть майже вертикально. Проте наскільки глибоким є провал все ще залишалось неясним. Стало відомо лише, що на глибині близько 80 м дна ще немає. А нижче промені не пробивалися.

Оскільки в знайдених отворах освітленого Сонцем дна все ще не було видно і їх стіни – є майже вертикальними, то вони не являються зруйнованими ерозією ямами. Усі сім знайдених тоді отвори знаходилися недалеко від провальних кратерів на вершині, або ж продовжують їх ланцюжки.

Вважається, що по аналогії із земними вулканічними печерами, такі провали утворюються у моменти, коли потоки розплавленої лави «випаляють» під поверхнею планети порожнечі, сповзаючи по схилу молодих щитових вулканів [118].

Потім, наприклад, у результаті землетрусів, зовнішні шари можуть провалюватися в утворені порожнечі і створювати темні «колодязі» на Марсі.

Дуже різкі краї цих провалів свідчать про їх відносну молодість. Адже на Марсі є атмосфера із постійними вітрами, котрі весь час засипають нові ями піском і пилом [49, 60, 62, 112, 132, 139].

На Землі такі кратери також знаходять на схилах молодих щитових вулканів. Можливо, що подібним способом утворилися й темні «колодязі» на Марсі. Вік наймолодших слідів вулканічної активності на Марсі оцінюють в декілька десятків мільйонів років [129, 146, 147]. Діаметри знайдених отворів знаходяться в межах від 100 до 252 м.

Два із семи таких об'єктів були досліджені також ще й за допомогою інфрачервоної зйомки. Виявилось, що температура їх не залежить від сезону [105, 112] на планеті і є досить постійна у будь-який час доби: на денному світлі ці провали холодніші

за решту частини поверхні; та все ж вони не такі прохолодні як, наприклад, затінені ділянки місцевості.

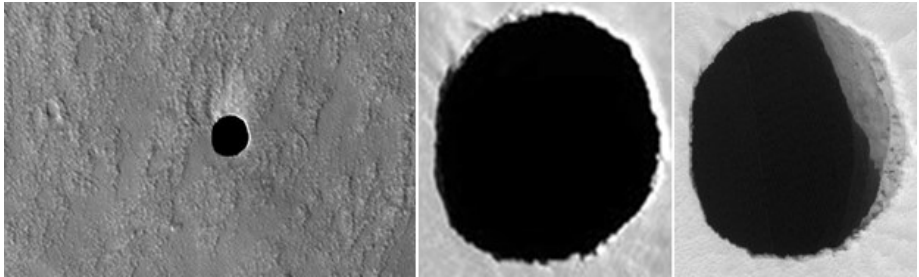


Рис. 26.1. Ліворуч – одна з темних плям на схилах вулкану Arsya на Марсі. Посередині і праворуч – провал Джінн, розміром 150×157 м; він освітлюється вертикально (посередині) і косими (праворуч) сонячними променями 08.08.2007 (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

А вночі ці об'єкти є теплішими від навколишньої місцевості. Це говорить на користь гіпотези про те, що дані об'єкти є «вікнами» в значній товщини стелі вулканічних печер. На зображенні на Рис. 26.2 (ліворуч) також схоже на те, що стеля лавової труби обрушилася в одній точці, утворивши яму діаметром у 50 м.

Вважають ймовірним, що підземна трубка у цьому місці є, принаймні, такого ж розміру. Але навіть це значення є набагато більшим, ніж аналогічні печери на Землі.

Дослідження понад двох сотень зображень ділянки на вулкані Pavonis Mons, отриманих за допомогою камери THEMIS космічного апарата «Mars Odyssey» з роздільною здатністю до 18 м, дозволило знайти чимало інших лавових трубок.

І на одному із зображень вдалося знайти невелику круглу темну пляму. Більшість марсіанських лавових трубок проглядається як прямі ланцюги обвалів. Вони зазвичай мають плоске дно та похилі схили. Однак чимало таких місць мають вертикальні сторони. У 2007 році за допомогою камери THEMIS знайшли ще кілька марсіанських отворів. Вони також могли бути місцями, в яких невелика частина даху печери чи лавової труби обрушилася. Розміри одного з них були 190×160 м і щонайменше 115 м у глибину.

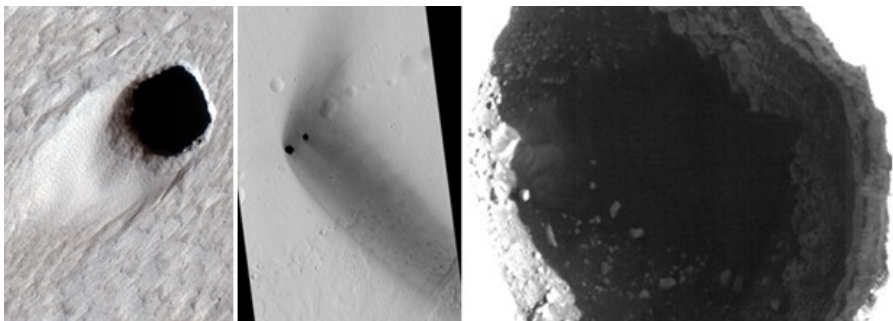


Рис. 26.2. Ліворуч – один із провалів до лавової печери (https://mars.nasa.gov/system/resources/detail_files/25306_PIA24149.jpg). Посередині – два темні отвори на північно західному схилі від гори Askraeus (01.12.2010) діаметром 180 м і 310 м (http://hirise.lpl.arizona.edu/ESP_019997_1975). Праворуч – більший отвір зблизька (https://hirise-pds.lpl_RED.browse.jpg).

Зображення отримане камерою HiRISE на орбітальному апараті «Mars Reconnaissance Orbiter» 01.12.2010 [99], включає дві темні ями приблизно 180 і 310 м у діаметрі (Рис. 26.2, посередині), які, очевидно, внизу з'єднані більшою печерною западиною, розташованою на схилі Askraeus Монс.

Ці ями розташовані посеред великого тонкого темного викиду з них у формі бумеранга. Викиди можуть складатися з матеріалу [144], винесеного або з ям, або з якогось іншого джерела та розвіяного місцевими вітрами.

Зображення на Рис. 26.2 (праворуч) показує внутрішню частину більшої ями діаметром близько 310 м. Яма має дуже стрімку східну стінку (праворуч) і значно пологішу – західну. Тіні та виступи закривають частину інтер'єру, але на підлозі видно світлі валуни. Менша яма містить валуни та осад уздовж стінок і більш яскраві солові відкладення на її дні.

Те ж саме видно і в більшій ямі. Тобто, обидві ями мають східні круті виступи з валунами, які нависають і падають на дно ями; західні стіни є більш пологими і поступово переходять у дно ями. Дані об'єкти можуть бути основною метою досліджень найпершими поселенцями.

27. Темні отвори (плями) на Марсі можуть бути отворами до льодяних печер.

На поверхні Марса знайдено багато гірських масивів і рівнинних територій із вулканічними та ударними кратерами різного віку [118, 119, 123, 130]. На початку 2000-них років на схилах вулкану *Argus* були знайдені 7 темних плям. Їх назвали жіночими іменами Венді, Дена, Джінн, Еббі, Ені, Ніккі та Хлоя.

Пізніші дослідження показали, що ці темні плями насправді є глибокими провалами в стелі до дуже великих вулканічних печер. Вони могли утворюватися внаслідок западання матеріалу поверхні в підземні порожнини. Оскільки вони утворюють ланцюжки і розломи, із виразним візерунком, то, найімовірніше, вони викликані розтягуванням поверхні. Причиною розтягувань і розтріскувань могли бути вулканічні процеси [145]. В ці порожнини згодом могли провалитися породи з поверхні, залишивши там западини [137, 144].

Thynetus Mons – є одним з найстаріших вулканів на Марсі. Тому на його схилах утворилося чимало радіально розташованих ярів (Рис. 27.1, ліворуч). При вулканічних виверженнях лава проникала крізь замерзлі шари ґрунту, і стікала по схилах.

На відміну від більшості інших марсіанських вулканів [136], його схили складаються переважно з шарів вулканічного попелу, а не з базальтового матеріалу. Така відмінність приводила до того, що схили вулкана легко розмивалися, утворюючи у різних місцях широкі канали від декількох кратерів на його вершині.

Льодовикові печери також утворюються в тілі льодовиків під впливом талої води. Вони утворюють ходи, висотою до кількох метрів, довжиною у кілька сотень метрів, глибиною – до 100 м і більше. Мільярди років тому на поверхні Марса знаходилися величезні океани, моря, довгі річкові системи і озера. У той час Марс мав бути схожим на Землю [49].

Але з тих пір ця планета була позбавлена і атмосфери [126], і рідкої води [142]. Можливо, навіть, що на Марсі могли встигнути розвинутися певні форми життя [85, 111, 115, 117]. Проте досі не знайдено жодного доказу щодо цього.

Космічний апарат «*Mars Reconnaissance Orbiter*» досліджує поверхню планети з орбіти [91, 99], отримуючи багато високоякісних зображень поверхні. На рівнині *Hebrus Valles* поруч із вулканічним регіоном Елізіум також розташовані численні канали шириною від кількох сотень метрів до кількох кілометрів. У місці, де закінчується один з каналів, розташована подовжена яма (Рис. 27.1, праворуч) довжиною приблизно 1800 м і шириною 1125 м.

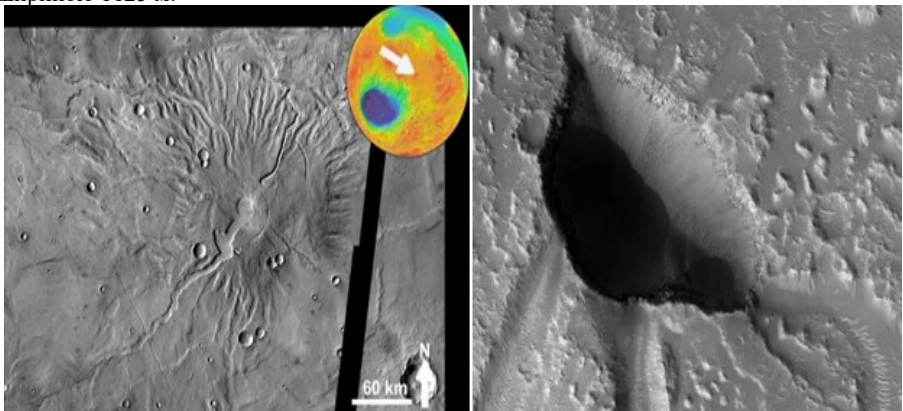


Рис. 27.1. Ліворуч – Тірренська гора, отримана отримана з апарата «*Mars Odyssey*» 24.02.2022 (https://photojournal.jpl.nasa.gov/figures/PIA25159_fig1.png).

Справа – котлован з розміром 1875×1125 м (NASA/JPL-Caltech/UA/Arizona).

За тінню, яку відкидає стіна на дно ями, глибину ями оцінили в 500 м. Дно ями вкрите відкладеннями та шаром валунів. Схили котлована також усяні валунами діаметром до кількох метрів. Такі ями можуть утримувати під поверхнею водний лід [114], який могли б використовувати майбутні довгострокові поселення [141, 143]. Але окрім забезпечення водою, ями також можуть бути використані як природний притулок для поселень.

Тому вони є потенційними місцями висадки для дослідження людиною. Кругла чорна пляма на зображенні з камери THEMIS також є отвором у даху (Рис. 27.2), можливо, марсіанської лавової труби, або льодовикової печери.

Дослідження понад двох сотень зображень ділянки Марса на вулкані Pavonis Mons, отриманих за допомогою камери THEMIS з космічного апарата «Mars Odyssey» з хорошою роздільною здатністю, дозволили знайти чимало марсіанських лавових трубок. Вони видні у вигляді ланцюгів обвалів із плоскою основою та похилими боками.

Але там знайдено і кілька темних вертикальних провалів. Ці отвори були аномальними порівняно зі звичайними кратерами ланцюгової ями. Вони нагадували відносно прямий отвір, що спускався під поверхню. Припустили, що вони є світловими «вікнами», коли невелика частина даху печери обрушилася. Вони були холоднішими за поверхню вдень, і теплішими за неї – вночі.

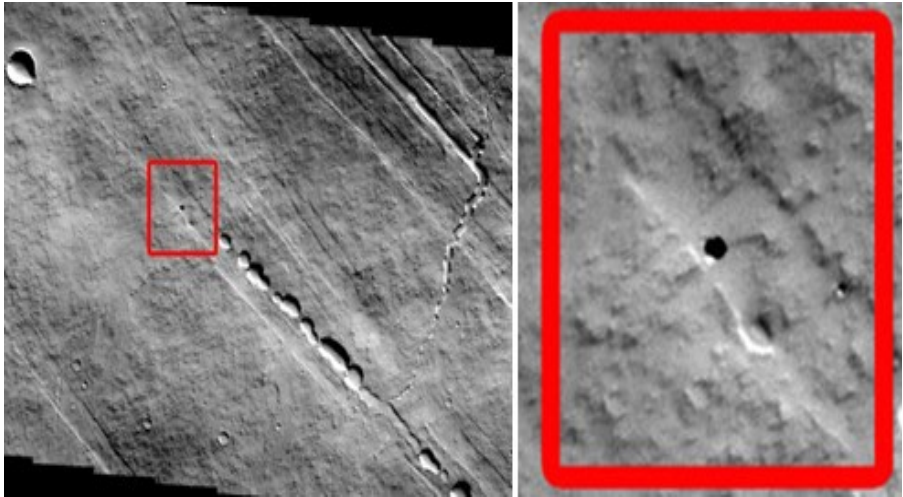


Fig. 27.2. Можливий отвір у даху марсіанської лавової трубки (https://www.redshift-live.com/binaries/asset/image/28604/image/Martian_Hole.jpg).

Саме цього слід було очікувати. Адже температури на поверхні Марса мають значний добовий діапазон змін, тоді як температури під поверхнею залишаються майже незмінними.

За оцінками, розміри отвору виявилися приблизно 190×160 м і 115 м в глибину. Марс є найбільш схожою на Землю планетою в Сонячній системі.

Він містить численні ландшафти та форми рельєфу, які демонструють подібність до відомих об'єктів на Землі. Особливо вражаючими прикладами є марсіанські льодовикові потоки та яри, що нагадують порізані річками земні аналоги.

Саме вони інтенсивно вивчаються протягом останніх кількох десятиліть. Це дозволяє зрозуміти еволюцію марсіанської поверхні. Одну з таких особливостей називають ями [72] (Рис. 27.3).

Такого типу ями зустрічаються переважно в південній частині Acidalia Planitia на Марсі, на захід і північний захід від Cydonia Mensae (Рис. 27.4).

До недавнього часу вважали, що більшість овальних западин на планетах земного типу і супутниках є ударними кратерами [140]. Проте після отримання зображень поверхні Марса з дедалі вищою роздільною здатністю, дослідники почали бачити деталі, які ставлять під сумнів їх пояснення результатом зіткнення з метеоритами.

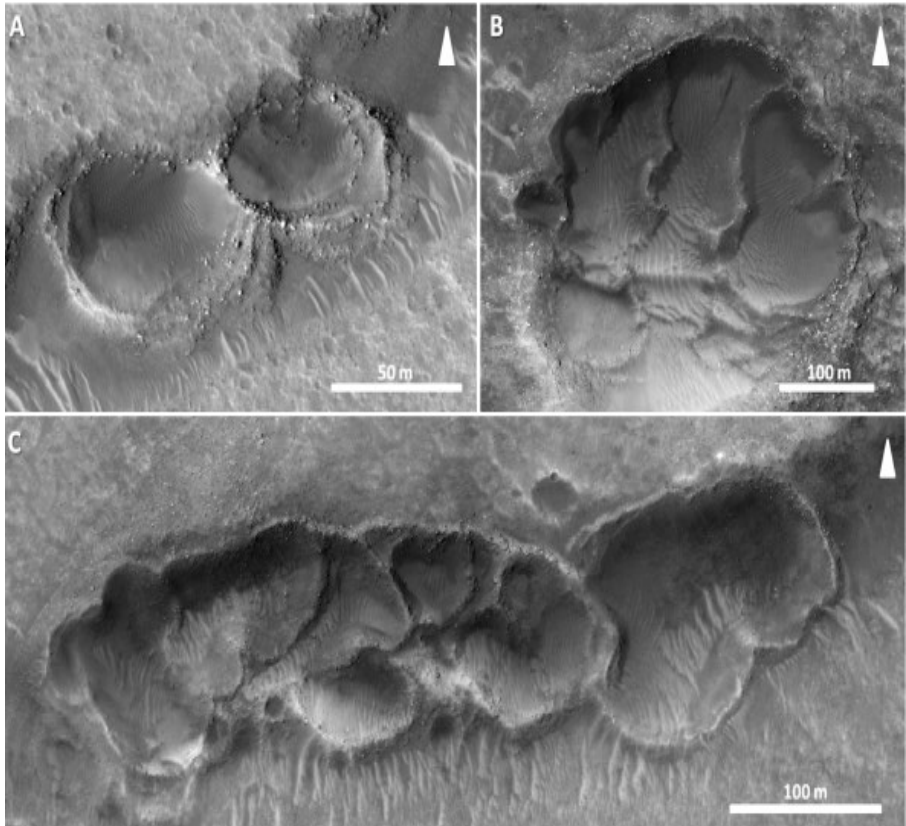


Рис. 27.3. Різні морфологічні варіанти ям, розташованих в Acidalia Planitia. А) Круглі ями з багатьма валунами по краях (HiRISE ID: ESP_019783_2115_RED). В) Подовжені ями без явного перекриття крайових відкладень (HiRISE ID: ESP_026521_2130_RED). С) Скупчення кількох ям на схилі топографічного об'єкта, направлено до екватора (HiRISE ID: ESP_026521_2130_RED).

Ці ями у формі ланцюгів схожі на провалену поверхню. Кожна з них має округлу, подовжену, або неправильну форму з піднятими краями і досягає кількох сотень метрів у діаметрі.

Переважно вони розташовані на звернутих до екватора пологих (до 2°) схилах підвищень, на внутрішніх стінах кратерів тощо. Зазвичай вони утворюють ланцюжки, але існують і окремо [152].

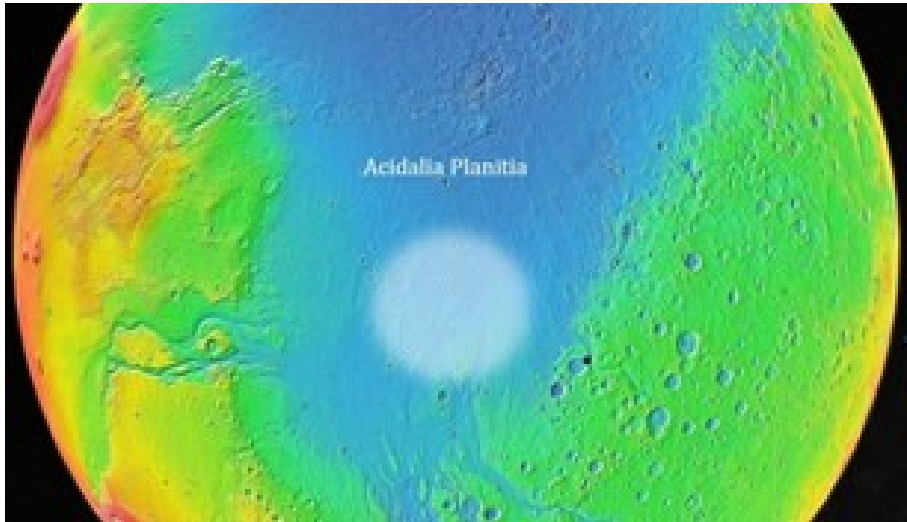


Рис. 27.4. Карта великих північних рівнин Acidalia Planitia. Світлим колом показано розташування більшості задокументованих ям (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Відсутність накладання гребнів ям свідчить про те, що більшість із них утворилися більш-менш одночасно (Рис. 27.5). Хоча іноді менші ями можуть бути вкладені у більші.

Це свідчить про можливість численних епізодів утворення ям. Ями здаються відносно неглибокими, а підняті краї складаються з валунів. Дно деяких ям частково вкрите еоловими формами, і там немає доказів річкової активності. Їх виникнення не збігається з залежними від широти відкладеннями льоду і пилу, які покривають великі смуги на середніх широтах.

До появи отриманих «HiRISE» зображень, вважалося, що ями утворювалися подібно до земних еолових викидів [42, 62, 139]. Але неправильна форма багатьох ям суперечить утворенню вторинних кратерів, або вулканічних особливостей. Натомість їх орієнтація щодо екватора пропонує необхідність врахування контролю інсоляцією.

Крім того, дещо підняті бокові стіни усіх ям можуть свідчити про високоенергетичне «розкопування» якимось невідомим агентом. Однією із можливостей є дія газових струменів, створених шляхом сублимації CO₂ під покладами сухого льоду. Однак, потужні плити сухого льоду навряд чи можуть бути присутніми близько до поверхні на низьких широтах Марса, де і спостерігаються ці ями.

Інша можливість утворення ям полягає в тому, що вони можуть бути залишковими формами рельєфу з часів, коли багата пилом та льодом верхня оболонкова частина поверхні поширювалася далі до екватору, або ж коли відбувалися контрольовані інсоляцією викиди води на схилах [101, 146]. Однак вибір між цими можливостями все ще не здійснено. Також можна вважати, що утворення ям можуть бути викликані криогенними процесами у промерзлих ґрунтах [129].

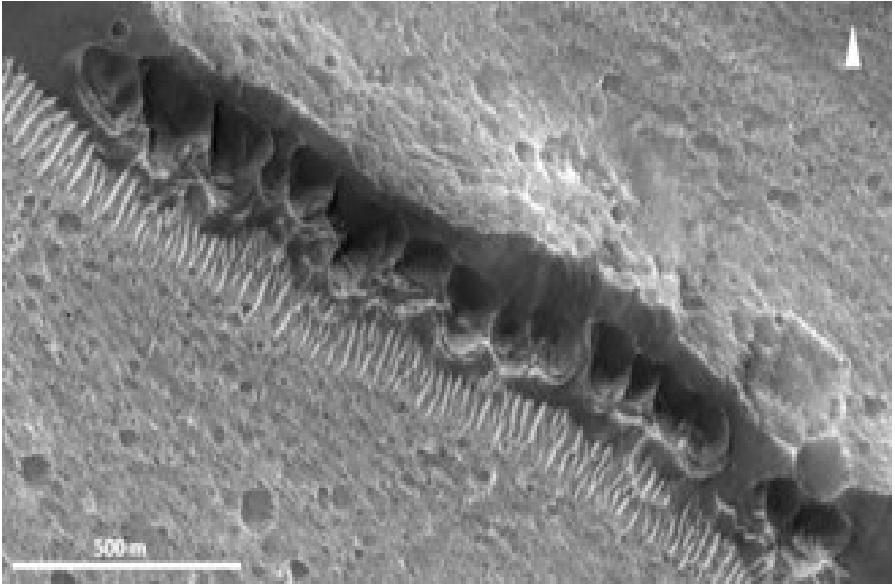


Рис. 27.5. Ланцюг ям, розташованих на зверненому до екватора схилі місцевого хребта. Ями виглядають молодими через добре збережені краї ям (NASA/JPL/UofA for HiRISE ID: PSP_PSP_008641_2105_RED

На такі пояснення наштовхують зображення, отримані камерою «HiRISE» із роздільною здатністю до 0.3 м на піксель. Подібні порожнини зустрічаються на схилах марсіанських кратерів на Arsia Mons, Pavonis Mons у північній півкулі та на Alba Patera у південній півкулі.

Такі порожнини можна порівняти з вулканічними печерами гавайського типу. Там також можна бачити лінійно розташовані кратерні утворення, дуже схожі на кратери на вулканах Марса. Виходячи з карти місткості льоду, отриманої космічним апаратом “Mars Odyssey”, у цих місцях вулканічних схилів спостерігається зовсім невелика кількість водяного льоду: до 2-4% за вмістом водню. Тому знайдені там провали важко пояснити лише розмерзанням льоду під поверхнею.

Максимальна вулканічна діяльність на Марсі мала місце приблизно 3.6 мільярди років тому. І майже закінчилася вона, ймовірно, приблизно 1.8 мільярди років тому. Ланцюги западин на Arsia Mons вписуються в ці вулканічні процеси. А ряд ланцюгових западин у центральній частині Chryse Planitia з координатами 30.36°N та 323.37°E викликані, швидше за все, обвалом і просіданням поверхневих шарів.

Цей механізм може бути відповідальним за утворення ряду обвалених каньйонів, або витягнутих форм просідання суші у результаті танення льоду під верхнім шаром поверхні.

Такі форми, найімовірніше можуть бути пов'язані із системами танення льоду [5], викликаними допоміжною топографією місцевості, або, навіть, із тектонікою та внутрішніми тріщинами у деяких скелях. Тоді проточна вода або розсіл під поверхнею, що надходили із шару льоду, могли під час замерзання накопичуватися та створювати поздовжній пагорб; пізніше він міг обрушуватися через сезонне [105] відтаювання, утворюючи яри та каньйони.

На кінцях цих ярів інколи можна побачити залишкові сліди витоку, ніби у ґрунті з'явилася тріщина, через яку рідина витекла на поверхню.

Тобто, відтаювання льоду може створити такого роду западину; іноді вона буде злегка звислою та з пологими схилами. На Землі ці явища спостерігаються у Канаді та на Алясці.

28. Вулканічні і льодяні печери на Марсі.

Яскравими представниками кратерів вулканічного походження є величезні кратери на чотирьох вершинах найвищих на планеті Марс гір: Olympus, Askraeus, Arsya та Pavonis. Ці стародавні марсіанські вулкани могли залишити після себе великі лавові трубки [136]. На початку двохтисячних років на фотографіях вулканічного плато Tharsis камерою THEMIS космічного апарату «Марс Одисей» на схилах вулкану Arsya знайшли сім темних плям [100]. Їх назвали жіночими іменами Венді, Дена, Джінн, Ені, Еббі, Ніккі та Хлоя.

Ретельні дослідження показали, що вони є вхідними провальними отворами в глибокі печерні утворення під поверхнею планети. Вони мають діаметри в межах 100-252 м; їх стіни – майже вертикальні. Тому вони не є зруйнованими ерозією ямами. Оскільки всі сім отворів знаходяться недалеко від провальних кратерів великого вулкану, то такі кратери на Землі утворюються у моменти, коли потоки розплавленої лави «випалюють» під поверхнею планети порожнечі, сповзаючи далі по схилу вулкана. Потім, у результаті землетрусів, зовнішні шари просідають в утворювані порожнечі.

Про відносну молодість цих утворень свідчать різкі краї провалів. Адже на Марсі є атмосфера і постійний вітер засипав би старі ями піском [62, 126].

Із вершин деяких вулканів на Марсі опускаються довгі ерозійні русла. Такі утворення могли виникнути при обваленні не дуже твердого матеріалу поверхні [94] у підземні порожнини. Це могло відбутися при виверженні лави назовні крізь шар ґрунту із значним вмістом м'якого вулканічного попелу [141].

Такі вулканічні схили легко розмиваються та утворюють звивисті канали. Вважають, що в минулому на Марсі були величезні океани, довгі річки, моря та озера [28, 135, 138]. І тоді Марс був дуже схожим на нашу Землю [91, 144].

Проте з часом, на планеті майже зникла атмосфера та рідка вода. Можливо, також, що на Марсі існували деякі життєві форми [85, 86, 111, 115, 117, 121]. Наприклад, поруч із вулканічним регіоном Елізіум на рівнині Hebrus Valles знайдено канали шириною від сотень метрів до кількох кілометрів [101, 146]. А в кінці одного із русел знайшли яму довжиною 1800 м, шириною 1125 м і глибиною 500 м.

Яма вкрита відкладеннями і шаром валунів на дні та схилах. Такі ями можуть утримувати водний лід під поверхнею. При обробці понад двох сотень зображень ділянки на схилах вулкана Pavonis, зроблених тепловою системою «THEMIS» на космічному апараті «Mars Odyssey», з роздільною здатністю 0.3 м на піксель, також були знайдені лавові труби та кілька округлих темних плям.

Чимало лавових трубок проявляються ланцюгами обвалів із плоским дном і майже вертикальними боками. На північний захід від Askraeus Mons знайдено дві чорні ями діаметром 180 і 310 м.

Розташовані вони посередині темного покладу у формі бумеранга (Рис. 28.1, ліворуч). Цей матеріал, скоріше всього, був винесений з ям та розвіяний місцевими вітрами. У східній, трохи меншій з двох ям, містяться валуни та осад порід уздовж стінок, і яскравіші відкладення на її дні.

Більша, західна яма (Рис. 28.1, праворуч), також має схожу структуру. На зображенні камери «High Resolution Imaging Science Experiment» з космічного апарата «Mars Reconnaissance Orbiter» показано внутрішню частину ями діаметром близько 310 м. Обидві ями мають крутіші східні стіни (праворуч) з виступами, що містять валуни, та пологі західні стіни, які поступово переходять у дно ями. Частину інтер'єру закривають тіні і виступи. Марс містить ландшафти і форми рельєфу [132], які демонструють подібність до відомих об'єктів на Землі. Особливо вражаючими прикладами є марсіанські льодовикові потоки і яри, що нагадують порізані річками земні аналоги.

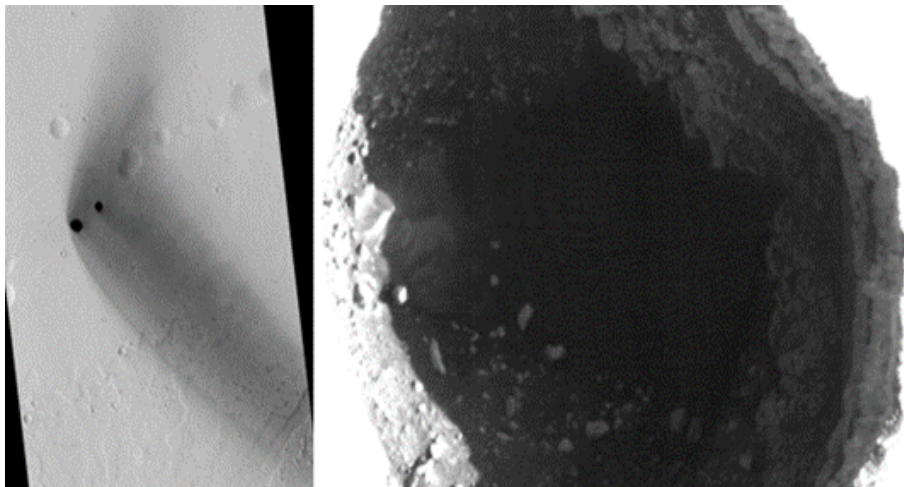


Рис. 28.1. Ліворуч – два темні отвори на північно західному схилі від Askraeus Mons з діаметрами 180 м і 310 м (http://hirise.lpl.arizona.edu/ESP_019997_1975). Праворуч – внутрішня частина ями більшого розміру (http://hirise.lpl.arizona.edu/ESP_019997_1975).

Одну з таких особливостей називають яма. Ями – це об’єкти, які зустрічаються в південній частині Acidalia Planitia (Рис. 27.3), на захід і північний захід від Cydonia Mensae. Вони мають круглу, подовжену або неправильну форму з піднятими краями і досягають діаметра до кількох сотень метрів.

Всі вони переважно розташовані на схилах, звернених до екватора. Наприклад, на внутрішніх стінках ударних кратерів, або на будь-якій іншій формі рельєфу з позитивним рельєфом до 3.2° ; але частіше – вони є на більш пологих схилах між 0.7° і 1.8° . Зазвичай вони утворюють кластери або ланцюжки, але існують і окремо. Відсутність суперпозиції гребнів ям свідчить про те, що багато окремих ям у ланцюзі могли утворитися більш-менш одночасно.

Ями зосереджені між 24° і 36° пн. ш., і їх виникнення не збігається з залежною від широти будовою мантиї, атмосферним відкладенням льоду та пилу [64, 139], які покривають великі смуги середніх широт. До появи отриманих «HiRISE» зображень вважалося, що ями утворювалися подібно до наземних еолових викидів.

Крім того, неправильна форма вигляду багатьох ям суперечить утворенню вторинних кратерів, або вулканічних особливостей. Натомість орієнтація на екватор – може вказувати на контроль їх утворення інсоляцією (Рис. 27.5).

А їх підняті краї – можуть свідчити про високоенергетичні викиди якогось невідомого агента. Однією із таких можливостей є газові струмені, створені шляхом сублимації газу CO_2 під плитою сухого льоду. Однак товсті плити сухого льоду є мало очікувані на тих низьких широтах, де трапляються ями.

Інша можливість полягає в тому, що вони являють собою залишкові форми рельєфу з тих часів, коли багата пилом і льодом оболонка поширилася до екватору, або ж це був контрольований інсоляцією потужний викид води [152]. Проте їх справжнє походження досі залишається невідомим.

Подібні ями, часто мають вигляд ланцюгів, і є схожими на провалену поверхню. Факторами, що спричинили такий обвал, можуть бути охолоджена лава або кріогенні процеси.

Тобто, ці западини можна пояснити або таненням підповерхневого шару льоду, або охолодженням лави після проходження по лавових трубах. Оскільки охолодження спричиняє зменшення об'єму, то область над лавою буде руйнуватися.

На багатьох фотографіях поверхні Марса (Рис. 28.2) подібні порожнини зустрічаються на схилах марсіанських кратерів на Arsia Mons [137], Pavonis Mons, Alba Patera та інших. Такі порожнини можна порівняти з вулканами гавайського типу. Наприклад, на вершині Мауна-Лоа можна побачити лінійно розташовані кратери, схожі на кратери для Arsia Mons (рис. 28.2).

Виходячи з карти льодомісткості, виміряної апаратом “Mars Odyssey”, в цьому місці вулканічного конуса можна спостерігати досить невелику долю льоду, яка коливається в діапазоні 2-4% вмісту водню. Тому важко пояснити ці ями розмерзанням льоду під поверхнею. Вважається, що розквіт вулканізму на Марсі був приблизно 3.5-3.7 мільярда років тому і закінчився, ймовірно, приблизно 1.8 мільярда років тому [118, 119, 144, 145]. Ланцюги западин на Arsia Mons добре вписуються в ці вулканічні процеси.

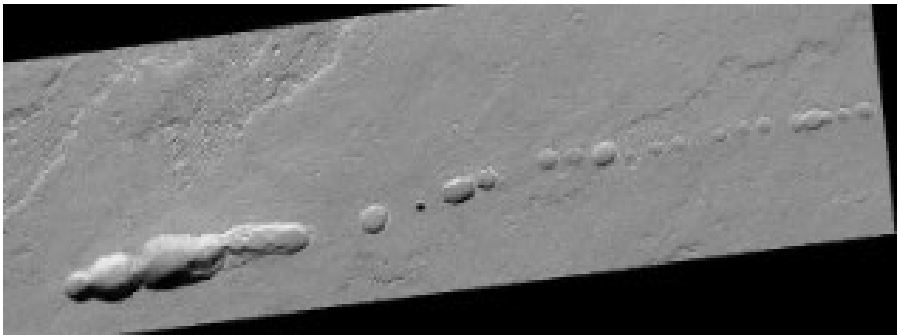


Рис. 28.2. Ланцюг ям на південь від Arsia Mons; вершина вулкана має висоту 16 км, і ці западини розташовані вздовж розломів і гребенів на висоті 14.5 км (HiRISE, ESP_012600_1655, координати центру -14.285°N; 240.051°E).

У центральній частині Chryse Planitia (30.360°N, 323.373°E) (Рис. 27.5) є ряд ланцюгових западин, викликаних, швидше за все, обвалом при просіданні поверхні в результаті танення льоду [112], або тектонікою та внутрішніми тріщинами в скелях. Тоді протікаюча під поверхнею вода або розсіл, що надходить із шару льоду, може під час замерзання накопичуватися та створювати поздовжній пагорб, який обрушується через сезонне [96, 105] відтаювання, утворюючи яри або каньйони.

На кінці деяких із цих ярів можна побачити сліди таких витоків на поверхню. Зображення, отримані апаратом «Mars Express», показують серію ланцюгів ям на схилах одного з найбільших вулканів у Сонячній системі. Залежно від їх походження, вони можуть бути цілими в пошуках мікробного життя на Марсі. Регіон Фарсіда на Марсі може похвалитися кількома величезними вулканами.

В північній частині регіону розташований один із найбільших вулканів у Сонячній системі за площею та об'ємом – Альба Патера. На його південно-східному схилі розташована Трактус Катена; а ланцюги ям у цьому регіоні являють собою низку круглих западин, які утворилися вздовж розломів у марсіанській корі.

Подібні особливості сьогодні спостерігається в Канаді та на Алясці, де через танення вічної мерзлоти утворюються канави та ями глибиною кілька метрів.

29. Які печери краще підходять для проживання на Марсі?

Зараз перед людством постало нагальне питання щодо освоєння Марса. Для цього необхідно відправити туди перших поселенців, і передбачити можливість забезпечити їх проживання у ворожому середовищі протягом тривалого часу. На сьогодні, це досить складне завдання для науковців і інженерів. Адже воно не залишає права на помилку, оскільки йдеться про людське життя. Планування місій до Марса є першим кроком до початку ери міжпланетних переселень, яка змінить історію людства [28].

На зараз питання щодо розміщення перших поселень для людини на Марсі є дуже актуальним. Людство зробило перші кроки ще у 1970-х роках ХХ ст., побувавши на Місяці. Проте подорож до Марсу потребує набагато більше часу і зусиль.

Для серйозного підходу до освоєння цієї планети, необхідно продумати подорож до Марса, з огляду на довгострокові перспективи перебування там людини. Адже колонізація цієї планети людиною повинна передбачити повноцінне функціонування людини у ворожому для неї середовищі.

При плануванні перших польотів на Марс необхідно моделювати широке коло можливих ситуацій, з якими можуть зустрітися перші колоністи. Марс є відносно спокійною планетою з досить холодним кліматом. Там є розріджена атмосфера, що складається переважно із вуглекислого газу і дуже слабке магнітне поле.

Тому вся поверхня планети постійно бомбардується космічними променями та потоком високоенергетичних заряджених частинок сонячного вітру. Ще однією особливістю Марса є часті локальні і глобальні пилові бурі.

Недавно там відкрито значні запаси води у вигляді льоду. Її знайшли як у полярних шапках, так і під всією поверхнею, починаючи із глибин у 15-20 см [57]. По цій причині, житлові та робочі приміщення для колоністів найкраще будувати під поверхнею, для надійного захисту від космічної радіації. Ці колонії необхідно забезпечити енергією.

В даному випадку, сонячні батареї не будуть найкращим варіантом, тому що потік сонячного випромінювання на Марсі є значно меншим, ніж на Землі. Також, панелі будуть постійно заповнюватися піском через часті пилові бурі. Оптимальнішим варіантом може бути ядерний реактор.

Крім того, для людини потрібен постійний доступ до водних ресурсів. Тому вибір місця для першого поселення має бути дуже ретельним. З точки зору надійності майбутнього житла, цим вимогам найкраще відповідає вулканічна лавова трубка з міцними стінами. Нею є порожнисте утворення у корі, утворене в результаті витікання вулканічної лави. А виходячи із необхідності забезпечити поселення людей водою, більш підходящим випадком слід вважати підземні печери у льодовикових тріщинах з пологим горизонтальним входом.

Адже там вже є значні поклади водяного льоду під поверхнею, намерзлі за мільйони років як конденсат, або утворені підземними джерелами [49, 55]. Але стіни таких поселень будуть менш міцними, і вони вимагатимуть уважнішої попередньої підготовчої роботи.

Найкращим випадком була б лавова трубка з міцними стінами, знайдена поруч із потужними льодовиковими структурами. Сама колонія, скоріше за все, матиме вигляд окремих приміщень, з житловими, інженерними, ліфтовими та тепличними відсіками. Вони повинні будуть сполучені між собою невеличкими перехідними тунелями для контролю в них тиску і складу штучно створеної атмосфери.

Поруч має бути розташований ядерний блок електростанції. Зрозуміло, що на поверхні Марса мають бути кілька невеликих купольних приміщень та сонячних електростанцій.

Необхідно, щоб з часом колоністи перейшли на самозабезпечення провіантом. А тому там слід вирощувати їстівні культури. А отже, поселення на Марсі мають стати наступним технологічним проривом для людства.

Яскравими представниками вулканічних кратерів є великі кратери на вершинах найвищих на Марсі гір: Olympus, Askraeus, Arsya and Pavonis. Саме на схилах вулкану Arsya на початку двохтисячних років знайшли сім темних плям. Їх назвали жіночими іменами Венді, Дена, Джінн, Ені, Еббі, Ніккі та Хлоя. Ці темні плями на поверхні Марса виявилися глибокими кам'янистими колодязями, вхідними отворами в глибокі печерні утворення під поверхнею планети. Тобто, вони є провалами в стелі дуже великих підземних печер з діаметрами в межах 100-252 м.

Ці печери були утворені у моменти, коли потоки розплавленої лави «випалювали» під поверхнею планети порожнечі, і сповзали далі по схилу вулкана. Про відносну молодість цих утворень свідчать різкі краї провалів. Адаже їх не засипало піском та пилом, зважаючи на часті пилові бурі. Такі надійні печери цілком можна буде використовувати для створення перших постійних поселень. Вони дозволять надійно захистити людину від потужного радіаційного впливу.

А певним недоліком стане необхідність організувати доставку водяного льоду для забезпечення поселенців водними ресурсами. Саме вони можуть стати сировиною для добування так необхідного для людини кисню, і водневого палива для ракетних двигунів.

Поруч із вулканічним регіоном Елізіум на рівнині Hebrus Valles знайдено русла шириною від кількох сотень метрів до кількох кілометрів. У кінці одного з них виявили яму розміром 1800×1125 м і глибиною до 500 м. Вважають, що під поверхнею у таких ямах та поруч з ними – може утримуватися водний лід. Тому подібні утворення цілком можна використовувати для розміщення майбутніх довгострокових людських поселень.

На деяких ділянках на схилах вулкана Pavonis також були знайдені лавові труби з кількома округлими темними плямами. Такі лавові трубки проявилися ланцюгами обвалів із плоским дном і пологими, чи майже вертикальними боковими стінами. Провали в даху печер, або лавових трубок, відкривають доступ до них із поверхні планети. Поруч з горою Askraeus також вдалося знайти дві темні ями (Рис. 28.1, ліворуч). У ямах знайдено валуни та осад порід уздовж стінок, а також яскравіші дюнні відкладення на їх дні.

Обидві ями мають крутіші східні стіни (праворуч на Рис. 28.1) з виступами, що містять валуни, та більш пологі західні стіни, які поступово переходять у дно ями.

На схилах деяких із вулканів були виявлені довгі ерозійні русла. Вважають, що вони утворилися при западанні м'якого матеріалу поверхні у підземні порожнини. Цей легко еродований шар ґрунту міг мати значну долю м'якого вулканічного попелу [57, 61]. Наявність водяного льоду під поверхнею в таких каналах також робить їх придатними кандидатами для поселення тут людей у майбутньому.

У південній частині Acidalia Planitia та на заході і північному заході від Cydonia Mensae також знайдено чимало ям. Тобто об'єктів круглої, подовженої або неправильної форми з піднятими краями, які досягають до кількох сотень метрів у діаметрі (Рис. 27.5). Вони переважно розташовані на схилах, звернених до екватора, наприклад, на внутрішніх стінках ударних кратерів, чи на будь-якій іншій формі рельєфу з пологими схилами до 2°. Ці ями зосереджені на широтах між 24°N і 36°N. Орієнтація ям на екватор вказує на їх контроль інсоляцією.

Крім того, підняті краї можуть свідчити про їх високоенергетичне розкопування якимось невідомим агентом. Однією з можливостей є газові струмені, створені шляхом сублімації CO₂ під плитою сухого льоду. Інша можливість полягає в тому, що вони являють собою залишкові форми рельєфу з часів, коли багата пилом/льодом оболонка поширилася далі на південь, або контрольований інсоляцією викид води [152]. Тобто, або

таненням підповерхневого шару льоду, або охолодженням лави під ним. Оскільки охолодження спричиняє зменшення об'єму, то область над лавою може зруйнуватися.

Схожі структури можна спостерігати в кратері Коперник і в кратері Деві на Місяці, або на супутниках Юпітера Ганімеді і Каллісто, та на Меркурії [64, 85, 91]. Ямиланцюги можуть мати вулканічне походження. Лава, що витікає з вулкана, застигає на поверхні, і залишає розплавлену трубку лави, що тече вниз.

Коли вулканічна активність припиняється, трубка порожніє, і залишає за собою підземну порожнину. З часом частини даху над порожниною можуть зруйнуватися, залишивши на поверхні круглі поглиблення.

На Землі приклади таких порожнин можна побачити на схилах вулкана Кілауеа на Гавайях. На Місяці подібна порожнина знайдена біля Гедлі Рілле, який відвідав «Аполлон-15» у 1971 році. Вважається, що вона могла утворитися таким же чином мільярди років тому.

30. Наземна підготовка до вирощування врожаю на Марсі.

В пустелі Сан-Рафаель (штат Юта, США) знаходиться спеціальна дослідницька станція. На ній проводять різні дослідження по симуляції можливого проживання майбутніх астронавтів на Марсі. Зовнішній вигляд станції можна вважати своєрідним геологічним аналогом пустелі на поверхні Марса. Там приймають окремі групи із усього світу. Дослідницькі групи, зазвичай, протягом двох тижнів проводять певні експерименти, або ж виконують тестування розробленого обладнання.

Протягом зазначеного часу члени груп проживають в спеціальних модулях та харчуються фруктами й овочами, вирощеними у «місцевих» теплицях. А назовні модулів дослідники виходять тільки у скафандрах.

А 26 червня 2023 року вже четверо спеціально відібраних NASA астронавтів були відправлені на спеціально облаштовану «марсіанську базу» площею у 158 квадратних метрів в Космічному центрі Джонсона в Х'юстоні у штаті Техас – на термін в один рік.

Протягом п'яти найближчих років заплановано розробити методіку, котра дозволить майбутнім поселенцям вирощувати на Марсі продукти харчування.

Марс не являється хорошим місцем для перебування там людини [62-64, 135]. В залежності від сезону та часу доби температура на поверхні змінюється від 293 К влітку біля екватора до 120 К на полюсах взимку. Тому в багатьох країнах працюють над можливою підготовкою умов для проживання астронавтів з метою відправити їх в майбутньому на цю планету.

Подорож до Марса можна здійснювати лише один раз на майже 2 роки, і вона займатиме від 7 до 9 місяців [99, 100]. Це пов'язано з тим, що при обертанні Землі і Марса навколо Сонця, якраз через два роки обидві планети періодично знаходяться на найближчій відстані: у протистоянні.

Колоністи повинні будуть забезпечувати себе їжею. Взятото з собою із Землі провіанту – надовго не вистачить. Тому, окрім найрізноманітніших проблем, із котрими доведеться зустрітись там першим поселенцям, важливою проблемою стане і забезпечення їх їжею.

Для того щоб виживати на нашій планеті, людині потрібні чотири основні речі: житло, їжа, вода й одяг. А для виживання на Марсі, людині потрібна буде мінімум ще такі три речі – кисень, енергію та захист від радіації. Знаходження цих перелічених найважливіших ресурсів зможе забезпечити людині можливість стати міжпланетним видом.

Тобто, для створення колонії на Марсі, необхідно буде облаштувати цілісну екосистему, у котрій можна буде виконувати значну кількість життєвоважливих для людини функцій, при наборі необхідних рослин і тварин.

Гравітація на Марсі становить третину від земної. Немає якоїсь прямої методіки змінити силу тяжіння. А низька сила тяжіння негативно впливатиме на м'язову та кісткову масу і людей, і тварин. Тому, ймовірно, для заселення Марса найкращими будуть істоти невеликих розмірів, такі як ракоподібні, риби, інші мешканці морських глибин, миші, комахи тощо. Саме їх можна буде вживати в їжу, і вони не потребують значних ресурсів для свого розведення.

Крім того, бази для проживання на Марсі потрібно будувати із врахуванням звичних для людини значень тиску, температури й складу повітря [98].

Висока солоність розталोї води та відсутність у марсіанському ґрунті поживних речовин роблять ці умови непридатними для прямого використання при вирощуванні потрібних для харчування культур. Тому необхідно розробити стратегію збагачення марсіанського ґрунту поживними речовинами і методи опріснення дуже солоної води.

На Марсі знайдені поклади замерзлого льоду [101], котрий згідно проведених досліджень є дуже солоним. Тому, після танення, пропонується обробляти цю солону марсіанську воду спеціальними бактеріями, потім фільтрувати її через наявну там вулканічну породу. У результаті таких дій можна буде отримувати прісну воду, котра так необхідна як людині, так і для вирощування рослин.

Численні дослідження також показали, що ґрунт на марсіанській поверхні містить значну кількість різних токсичних хімічних сполук та перхлоратної солі. Вони є дуже шкідливими для земних рослин.

Так зване тераформування Марса означає повну перебудову всієї його поверхні, клімату та атмосфери. Проте це дуже тривалий і важкий процес. Тому поки що пропонується створювати там окремі тепличні господарства.

З цією метою в лабораторії Університету штату Айова в США провели спеціальні дослідження. Для проведення своїх експериментів штучно було створено аналог марсіанського ґрунту. Дослідники взяли земні вулканічні породи і провели в них експерименти по вирощуванню рослин.

Адже ґрунт Марс є продуктами минулого вулканізму. Надалі в такий ґрунтовий аналог додавали різні поживні речовини. Для опріснення морської води використовували особливі морські бактерії. Потім її фільтрували через земні вулканічні породи. Адже на Марсі ґрунт являє і є продуктами минулих вулканічних вивержень.

Дослідники починали із вирощування люцерни у вулканічному ґрунті, котрий за своїми властивостями нагадував реголіт на Марсі. Далі з неї виготовляли добриво. У цьому майже «марсіанському» ґрунті змогли виростити ріпу, редис (Рис. 30.1) та салат.



Рис. 30.1. Редис, вирощений в аналогу «марсіанського ґрунту» (<https://posteat.ua/wp-content/uploads/2022/08/radishplants-2-600x243.jpg>).

В цій імітації марсіанського ґрунту виростили ще й два генетично відредаговані сорти рису та один дикий. У такому сухому та солоному ґрунті в досить екстремальних умовах змогла вирости й картопля.

Експерименти змогли показати, що кількість перхлорату [36, 41] у три грами на один кілограм ґрунту являється пороговою величиною, за якою нічого корисного рости вже не може. А в ґрунті що містив менше 1 грама перхлоратів в одному кілограмі – все ще могли вкорінюватись модифіковані сорти рису.

Саме у такому ґрунті були висаджені три сорти рису. Один із них був дикий, та ще два – генетично змінені з тим, щоб вони могли реагувати на стресові ситуації, якими можна вважати посуху та значну засоленість ґрунту.

Паралельно такі ж сорти вирощувалися ще й у звичайній земній ґрунтовій суміші, та у деяких гібридних сумішах із різними наповненнями перхлоратами та іншими шкідливими хімікатами.

Після цього у подібних штучних умовах змогли зібрати також урожаї помідорів, моркви, зеленої квасолі, салату-латуку, крес-салату, жита. Доволі успішно вирощувати там ще й гриби.

Таким чином, значною проблемою, з якою зіткнуться «аграрії» на Марсі, будуть перхлорати.

Хоча зрозуміло, що потрібно перебороти низькі температури, радіацію тощо. Проведені дослідження підтвердили можливість не тільки вирощувати їжу для майбутніх поселенців на Марсі, але й отримувати насіння із цих культур.

Дослідники із Нідерландів отримали від фахівців НАСА імітаційні зразки ґрунтів для своїх «марсіанських» експериментів. Такі модельні ґрунти збагатили органічними добавками, взятими із ґрунтів, на яких раніше вже вирощувались певні культури. До такої «інопланетної» землі посадили руколу, томати, крес-салат, редис, шпинат, горох, жито, кіноа, шніт-цибулю й цибулю-порей.

У якості контрольних ділянок ці ж культури було висаджено ще й у звичайний земний ґрунт. 9 із висадженого десятка культур досить добре виростили на «земних», і на модельних ґрунтах та дали істотні частини. Винятком став лише шпинат.

Насіння трьох із отриманих культур (жита, крес-салату та редису) пізніше були протестовані на їхню схожість. Експеримент виявився успішним.

Та й кількість біомаси як на імітаційному марсіанському ґрунті, так і в земному ґрунті виявилися практично однаковими.

Проведені дослідження повністю підтвердили ідею стосовно того, що майбутньому на Марсі можливо буде не лише вирощувати рослинну їжу для того, щоб забезпечувати нею майбутніх поселенців, але й отримувати насіння для продовження вирощування цих культур.

Вважають, що згадані вище рослини можна вирощувати в атмосфері із значенням тиску близько 0.1 бара, що на порядок менше від середнього тиску на рівні моря на Землі.

Обстежені різними посадковими модулями ґрунтові зразки поверхні вказують на те, що із марсіанського реголіту цілком можливо виготовити ґрунт хорошої якості. Проте він може бути або дуже кислим, чи дуже лужним. Тому його доведеться покращувати додаванням потрібних речовини.

У 2019 році НАСА було проведено конкурс «BIG Idea Challenge – 2019» щодо вибору найкращого обладнання для вирощування рослин в умовах Марса.

Найкращим типом теплиці для вирощування рослин на Марсі було обрано розробку студентів з Дартмутського коледжу. Ними було представлено проєкт так званої купольної теплиці (Рис. 30.2).

Відзначалося, що вирощувати власну рослинну їжу на поверхні Марса астронавтам може дозволити гідропонна структура. У купольній системі, яка обертається, можливо буде вирощувати аж до 8 харчових культур.

Теплиця подібного типу зможе забезпечувати щоденний раціон для чотирьох астронавтів, забезпечуючи їм по 3100 калорій на протязі да шестисот днів їх перебування на планеті. Студенти пропонують вирощувати там капусту, батат, сою, броколі, полуницю, картоплю, пшеницю й чуфу. Масивний резервуар теплиці запропоновано заповнити живильним водним розчином, який за допомогою гравітації буде живити систему розташованих по колу лотків із різними культурами.

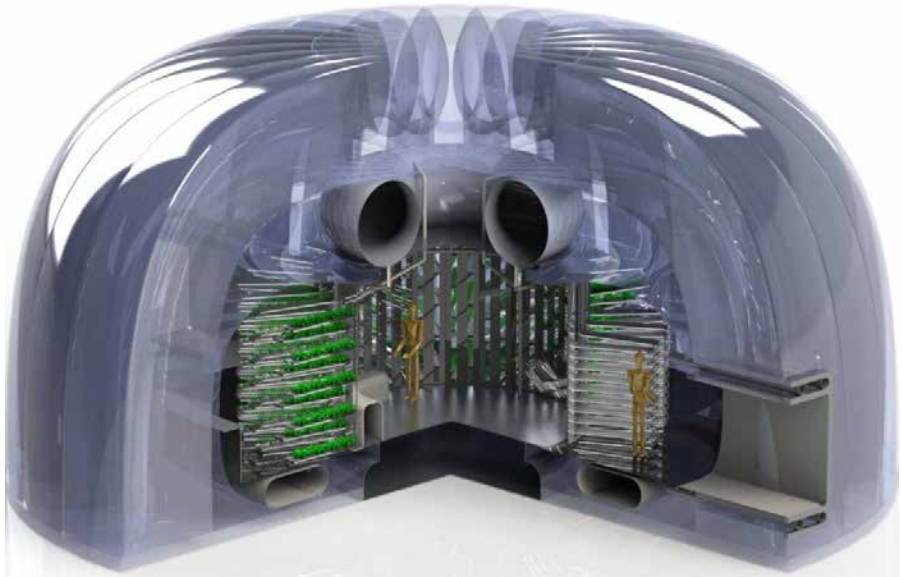


Рис. 30.2. Купольна марсіанська теплиця для вирощування рослин в умовах Марса, розроблена студентами із Дартмутського коледжу (https://static.ukrinform.com/photos/2019_04/1556623250-624.jpg).

Набір спеціально підібраних світлодіодів забезпечать достатню кількість світла. І таку теплицю цілком буде можливо транспортувати із Землі у складеному вигляді. А потім її буде розгорнуто на Марсі, і там підтримуватиметься її робота з досить обмеженим набором технологій і ресурсів.

Оцінки кліматичних умов поблизу екватора Марса показали, що вдень там може бути достатньо тепло для розміщення тепличних господарств. Проте їх потрібно ізолювати від впливу радіації, обігрівати сонячними технологіями та електричним опаленням, облаштувати умовами для підвищення атмосферного тиску, порівняно з існуючим зараз на Марсі.

В одному із проведених досліджень також було з'ясовано, що використовувати на Марсі тепличні будівлі з прозорим дахом і стінами для вирощування рослинної їжі за сучасних умов на планеті – є неможливим. Адже значення радіації на поверхні Марса у понад 17 раз більше від значень на поверхні Землі. Експерименти, проведені упродовж майже одного місяця показали непридатність вирощеної таким способом рослинної їжі для споживання.

Тобто, на поверхні Марса сонячного світла порівняно мало, і там надто великі значення радіації [135]. Тому, ми пропонуємо, що гідропонічні камери для вирощування рослинної їжі значно краще вкрити від впливу радіації насипами ґрунту, або ж узагалі сховати їх під поверхню у знайдених зараз лавових печерах. Контролювати спектр у таких теплицях та інтенсивність освітлення можна буде за допомогою штучного освітлення. Строго контролюватися також будуть якість води для поливу та поживні речовини у гідропоніці.

Кисень на Марсі ми повинні будемо добути самотужки. І добути його ми зможемо або з води, або ж із атмосферного вуглекислого газу CO_2 . Із води добувати кисень можна

кількома способами. Наприклад, за допомогою електролізу, пропустивши електричний струм крізь воду.

Проте найбільшим залишається питання щодо того, як конкретно «мертвий» ґрунт на Марсі перетворити на придатний для вирощування рослинних культур, збагативши його калієм, фосфором, азотом, потрібними бактеріями тощо. Адже всі вони є дуже важливими складовими, необхідними для вирощування рослин, які допомагатимуть забезпечувати астронавтів свіжими та поживними продуктами.

Список літератури.

1. Anderson D.L., Duennebier F.K., Latham G.V. et al (1976) The Viking seismic experiment. *Science*. 194(N4271), p. 1318-1321.
2. Banham S.G., Gupta S., Rubin D.M., et al. (2021) A Rock Record of Complex Aeolian Bedforms in a Hesperian Desert Landscape: The Stimson Formation as Exposed in the Murray Buttes, Gale Crater, Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*. 126(4), p. 1-35.
3. Batson R.M. (1973) Cartographic products from the Mariner 9 mission. *Journal of Geophysical Research*. 78(20), p. 4424-4435.
4. Becerra P., Sori M. M., Thomas N., et al. (2019) Timescales of the climate record in the south polar ice cap of Mars. *Geoph. Res. Letters*, 46(13), p. 7268-7277.
5. Burr D.M., Soare R.J., Tseung J.-M.W.B., Emery J.P. (2005) Young (late Amazonian), near-surface, ground ice features near the equator, Athabasca Valles, Mars. *Icarus*, 178(1), p. 56-73.
6. Byrne Sh., Dundas C.M., Kennedy M.R., et al. (2009) Distribution of Mid-Latitude Ground Ice on Mars from New Impact Craters. *Science*. 325(5948), p. 1674-1676.
7. Cain D.L., Kliore A.J., Seidel B.L., et al. (1973) Approximations to the mean surface of Mars and Mars atmosphere using Mariner 9 occultations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 78(20), p. 4352-4354.
8. Carr M.H. (1999) Retention of an atmosphere on early Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 104(E9), p. 21897-21909.
9. Carr M.H., Masursky H., Saunders R.S. (1973) A generalized geologic map of Mars. *Journal of Geophysical Research*. 78(20), p. 4031-4036.
10. Chapman M.G. (2007) *The geology of Mars: evidence from Earth-based analogs*. Cambridge, UK. New York: Cambridge University Press. -460 p.
11. Chevrier V. (2022) Limited stability of multi-component brines on the surface of Mars. *The Planetary Science Journal*. 3(5), p. 125.
12. Chevrier V.F., Hanley J., Altheide T.S. (2009) Stability of perchlorate hydrates and their liquid solutions at the Phoenix landing site, Mars. *Geophysical Research Letters*. 36(10), p. L10202.
13. Clancy R.T., Nair H. (1996) Annual (perihelion-aphelion) cycles in the photochemical behavior of the global Mars atmosphere. *Journal of Geophysical Research: Planets*. 101(E5), p.12785-12790.
14. Clifford S. (1987) Polar basal melting on Mars. *J. Geophys. Res.* 92: 9135-9152.
15. Colaprete A., Barnes J.R., Haberle R.M., et al. (2005) Albedo of the south pole on Mars determined by topographic forcing of atmosphere dynamics. *Nature*, 435, p. 184-188.
16. Conway S.J., 235Hovius N., Barnie T., et al. (2012) Climate-driven deposition of water ice and the formation of mounds in craters in Mars' north polar region. *Icarus*. 220(1), p. 174-193.
17. Cutts J. A. (1973). Nature and origin of layered deposits of the Martian polar regions. *J. of Geophysical Research*. 78 (20), p. 4231-4249.
18. de Vaucouleurs G., Blunck J., Davies M., et al (1975) The new Martian nomenclature of the international Astronomical Union. *Icarus*. 26(1), p. 85-98.
19. Di Achille G., Hynek B.M. (2010). Ancient ocean on Mars supported by global distribution of deltas and valleys. *Nature Geoscience*. 3 (7), 459-463.
20. Dlugach J.M., Morozhenko A.V., Vid'Machenko A.P., Yanovskij E.G. (1983) Investigations of the optical properties of Saturn's atmosphere carried out at the main astronomical observatory of the Ukrainian Academy of Sciences. *Icarus*, 54(May), p. 319-336.
21. Downs G.S., Reichley P.E., Green R.R. (1975) Radar measurements of Martian topography and surface properties. The 1971 and 1973 oppositions. *Icarus*. 26(2), p. 273-312.

22. Dundas C.M., Bramson A.M., Ojha L., et al. (2018) Exposed subsurface ice sheets in the Martian mid-latitudes. *Science*. 359(6372), p. 199-201.
23. Duxbury N.S., Zotikov I.A., Neelson K.H. et al. (2001) A numerical model for an alternative origin of Lake Vostok and its exobiological implications for Mars. *Journal of Geophysical Research*. 106(E1), p. 1453.
24. Edgett K., Williams R.M.E., Mallin M.C., et al. (2003) Mars landscape evolution: influence of stratigraphy on geomorphology of the north polar region. *Geomorphology*. 52, p. 289-298.
25. El Maarry M.R. (2007) Regional Analysis of the New Geochemical Maps of Mars Surface by Mars Odyssey GRS and its implications on the Martian Interior: Tharsis region. Master Thesis, Kiruna. -40 p.
26. El-Maarry M.R., Pommerol A., Thomas N. (2015) Desiccation of phyllosilicate-bearing samples as analog for desiccation cracks on Mars: Experimental setup and initial results. *Planetary and Space Science*, 111, p. 134-143.
27. El-Maarry M.R., Watters W., McKeown N.K., et al. (2007) Potential desiccation cracks on Mars: A synthesis from modeling, analogue-field studies, and global observations. *Icarus*. 241(2014), p. 248-268.
28. Fairén A.G. (2010) A cold and wet Mars. *Icarus* 208(1), p. 165-175.
29. Fisher J.A., Richardson M.I., Newman C.E., et al. (2005) A survey of Martian dust devil activity using Mars Global Surveyor Mars Orbiter Camera images. *Journal of Geophysical Research: Planets*. 10(E3), p. 1-18.
30. Fjeldbo G., Kliore A., Seidel B. (1972) Bistatic radar measurements of the surface of Mars with Mariner 1969. *Icarus*. 16(3), p. 502-508.
31. Formisano V., Atreya S., Encrenaz T., Ignatiev N., Giurannaet M. (2004) Detection of Methane in the Atmosphere of Mars. *Science*. 306(5702), p. 1758-1761.
32. Frey H., Schultz R.A. (1988) Large impact basins and the megaimpact origin for the crustal dichotomy on Mars. *Geophys. Res. Lett.* 15(3), p. 229-232.
33. Goldspiel J.M., Squyres S.W. (2000) Groundwater sapping and valley formation on Mars. *Icarus*, 148, p. 176-192.
34. Goldstein R.M., Gilmore W.F. (1963) Radar observations. *Science*. 141(3586), p. 1171-1172.
35. Goldstein R.M., Melbourne W.G., Morris G.A., et al. (1970) Preliminary radar results of Mars. *Radio. Sci.* 5(2), p. 475-478.
36. Gough R.V., Chevrier V.F., Tolbert M.A. (2014) Formation of aqueous solutions on Mars via deliquescence of chloride-perchlorate binary mixtures. *Earth and Planetary Science Letters*. 393, p. 73-82.
37. Grassi D., Formisano V., Forget F., et al. (2007) Fourier spectrometer (PFS-MEX). *Plan. & Space Science*. 55(10), p. 1346-1357.
38. Gupta S., Warner N., Kim R., et al. (2010) Hesperian equatorial thermokarst lakes in Ares Vallis as evidence for transient warm conditions on Mars. *Geology*. 38(1), p. 71-74.
39. Hartmann W.K. (1973) Martian Cratering. 4. Mariner 9 initial analysis of cratering chronology. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 78(20), p. 4096-4116.
40. Head J.W., 196 Marchant D.R., Kreslavsky M.A. (2008) Formation of gullies on Mars: Link to recent climate history and insolation microenvironments implicate surface water flow origin. *PNAS*, 105(36), p. 13258-13263.
41. Hecht M., Kounaves S.P., Quinn R.C., et al. (2009) Detection of Perchlorate and Soluble Chemistry of Martian Soil at the Phoenix Lander Site. *Science*, 325, p. 64-67.
42. Heldmann J.L., Toon O.B., Pollard W.H., et al. (2005) Formation of Martian gullies by the action of liquid water flowing under current Martian environmental conditions, *J. Geop. Res.*, 110, p. E05004.

43. Hoffman N. (2000) White Mars: A New Model for Mars' Surface and Atmosphere Based on CO₂. *Icarus*. 146(2), p. 326-342.
44. Howard A. (2000) The role of eolian processes in forming surface features of the martian polar layered deposits. *Icarus*. 144, p. 267-288.
45. Irwin R.P., Howard A.D., Craddock R.A., Moore J.M. (2005). An intense terminal epoch of widespread fluvial activity on early Mars: 2. Increased runoff and paleolake development. *Journal of Geophysical Research*. 110(E12), p. E12S15.
46. Jakosky B.M., Muhleman D.O. (1980) The longitudinal variation of the thermal inertia and of the 2.8-centimeter brightness temperature of Mars. *Astrophysical Journal, Part 1*, 239(July 1), p. 403-409.
47. Jakosky B.M., Muhleman D.O. (1981) A comparison of the thermal and radar characteristics of Mars. *Icarus*. 45(1), p. 25–38.
48. Jennifer L., Heldmann O.B., Toon W.H., Pollard M. (2005) Formation of Martian gullies by the action of liquid water flowing under current Martian environmental conditions. *Journal of geophysical research*. 110, p. E05004.
49. Kahn R. (1985) The evolution of CO₂ on Mars. *Icarus*. 62(2), p. 175-190.
50. Kieffer H.H., Chase Jr S.C., Miner E., Münch G., Neugebauer G. (1973) Preliminary report on infrared radiometric measurements from the Mariner 9 spacecraft. *J. Geo. Res.: Solid Earth*. 78(20), p. 4291-4312.
51. Kieffer H.H., Martin T.Z., Peterfreund A.R., Jakosky B.M., Miner E.D., Palluconi F.D. (1977) Thermal and albedo mapping of Mars during the Viking primary mission. 82(28), p. 4249-4291.
52. Kotelnikov V.A., Дубровин В.М., Дубинский Б.А. и др. (1963), Радиолокация планеты Марс в СССР. Докл.АН СССР. 151(4), p. 811–814.
53. Kuznyetsova Yu.G., Vidmachenko A.P., Steklov A.F. (2019) What can be called “traces” of life on Mars. 6-th Gamow ICo in Odessa and 19-th Gamow Summer School, Ukraine, Odessa, August 11-18, 2019, p. 52-53.
54. Lauro S.E., Pettinelli E., Caprarelli G., et al. (2020) Multiple subglacial water bodies below the south pole of Mars unveiled by new MARSIS data. *Nature Astronomy*. 5, p. 63-70.
55. Lee R.W., van Gasselt S. (2011) Geologic Mapping of the Pavonis Mons Fan-Shaped Deposit. EPSC-DPS Joint Meeting, 2-7 October 2011, Nantes, France, p. 1562.
56. Malin M.C., Edgett K.S., Posiolova L.V., et al. (2006) Present-Day Impact Cratering Rate and Contemporary Gully Activity on Mars. *Science*, 314(5805), p. 1573-1577.
57. McEwen A.S., Ojha L., Dundas C.M. (2011) Seasonal Flows on Warm Martian Slopes. *Science. American Association for the Advancement of Science*. 333(6043), p. 740–743.
58. Morozhenko A., Vidmachenko A., Kostogryz N. (2012) Polarimetry and Physics of Solar System Bodies. *Proceedings of the International Astronomical Union 10 (H16)*, p. 182-182.
59. Morozhenko A., Vidmachenko A., Kostogryz N. (2015) Spectrophotometric properties of Moon's and Mars's surfaces exploration by shadow mechanism. *Highlights of Astronomy*. 16, p. 182-182.
60. Morozhenko A.V., Vid'machenko A.P. (2004) Polarimetry and Physics of Solar System Bodies. *Photopolarimetry in Remote Sensing: Proceedings of the NATO Advanced Study Institute. Yalta, Ukraine. 20 September - 4 October 2003*. -503 p., p 369-384.
61. Morozhenko A.V., Vid'machenko A.P. (2005) Polarimetry and Physics of Solar System Bodies. *Photopolarimetry in Remote Sensing, NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry*. 161, p 369-384.

62. Morozhenko A.V., Vidmachenko A.P. (2017) Optical parameters of Martian dust and its influence on the exploration of Mars. *Dust in the Atmosphere of Mars and Its Impact on Human Exploration*, Proceedings of the conference held 13-15 June, Houston, Texas. LPI Contribution No. 1966, 2017, id.6010.
63. Morozhenko A.V., Vidmachenko A.P. (2017) What and how can affect the exploration of Mars. 19 ISCo AS YS. May 24-25, 2017. Bila Tserkva, Ukraine, 67-69.
64. Morozhenko A.V., Vidmachenko A.P. (2020) Dust can affect on the mastering of Mars. 22 International scientific conference *Astronomical School of Young Scientists*. December 11-12, 2020. Kyiv, Ukraine, p. 71-73.
65. Morozhenko A.V., Vidmachenko A.P., Kostogryz N.M. (2015) Spectrophotometric properties of Moon's and Mars's surfaces exploration by shadow mechanism. *Highlights of Astronomy*. 16, p. 182-182.
66. Morris R. V., Klingelhofer G., Bernhardt B., et al. (2004), Mineralogy at Gusev Crater from the Mossbauer spectrometer on the Spirit rover, *Science*, 305, p. 833-836.
67. Morrison D. (1968) Martian surface temperatures. *Research in space science*, 284, 1-48 p.
68. Mouginis-Mark P. (1979) Martian fluidized crater morphology: Variations with crater size, latitude, altitude, and target material. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 84(B14), p.8011-8022.
69. Murray B.C., Soderblom L.A., Cutts J.A., et al (1972) Geological framework of the south polar region of Mars. *Icarus*. 17(2), p. 328-344.
70. Murray B.C., Ward W.R., Yeung S.C. (1972) Periodic Insolation Variations on Mars. *Science*. 180(4086), p. 638-640.
71. Okubo Ch., McEwen A.S. (2007) Fracture-controlled paleo-fluid flow in Candor Chasma, Mars. *Science*. 315(5814), p. 983-985.
72. Orgel, C., Hauber E., van Gasselstet S. et al. (2019) Grid Mapping the Northern Plains of Mars: A New Overview of Recent Water- and Ice-Related Landforms in Acidalia Planitia. *Journal of Geophysical Research: Planets*. 124(2), p. 454-482.
73. Orosei R., Lauro S.E., Pettinelli, E., et al. (2018). Radar evidence of subglacial liquid water on Mars. *Science*. 361(6401), p. 490-493.
74. Palluconi F.D., Kieffer H.H. (1981) Thermal inertia mapping of Mars from 60°S to 60°N. *Icarus*. 45(2), p. 415-426.
75. Pettengill G.H., Shapiro I.I., Rogers A.E.E. (1973) Topography and radar scattering properties of Mars. *Icarus*. 18(1), p. 22-28.
76. Pettit E., Nicolson S.B. (1924) *Radiation Measures on the Planet Mars*. Publications of the Astronomical Society of the Pacific. 36, p. 269-272.
77. Piqueux S., Buz J., Edwards Ch.S., et al. (2019). Widespread Shallow Water Ice on Mars at High and Mid Latitudes. 9th International Conference on Mars. LPI Contrib. No. 2089, 6027.
78. Plaut J.J., 228 Picardi G., Safaeinili A., et al. (2007) Subsurface Radar Sounding of the South Polar Layered Deposits of Mars. *Science*. 316 (5821), p. 92-95.
79. Pollack J.B., Kasting J.F., Richardson S.M., Poliakov K. (1987) The case for a wet, warm climate on early Mars. *Icarus*. 71(2), p. 203-224.
80. Scheller E.L., Ehlmann B.L., Hu R., et al. (2021). Long-term drying of Mars by sequestration of ocean-scale volumes of water in the crust. *Science*. 372(6537), p. 56-62.
81. Simpson R.A., Tyler G.L., Leonard G. (1981) Viking bistatic radar experiment: summary of first-order results emphasizing north polar data. *Icarus*. 46(3), p.361-389.
82. Smith D.E., Zuber M.T., Frey H.V., et al. (1998) Topography of the northern hemisphere of Mars from the Mars Orbiter laser altimeter. *Science*. 279(5357), p. 1686-1692.

83. Sori M.M., Bramson A.M. (2019). Water on Mars, With a Grain of Salt: Local Heat Anomalies Are Required for Basal Melting of Ice at the South Pole Today. *Geophys. Research Letters*. 46(3), p. 1222-1231.
84. Steklov A.F., Vidmachenko A.P. (2019) Where and What Exactly Can Be the “Traces” of Life on Mars? The Mars Extant Life: What’s Next? Conference, originally scheduled for Jan. 29–Febr. 1, is now scheduled for Nov. 5–8, 2019 at National Cave and Karst Research Institute, Carlsbad, New Mexico. #5089. LPI Contrib. No. 2108.
85. Steklov A.F., Vidmachenko A.P. (2018) Similarity of Mars and Mercury for terraforming and settling of people. 20 ISCo AS YS. May 23-24, 2018. Uman, Ukraine, p. 90-91.
86. Steklov A.F., Vidmachenko A.P. (2019) In what places and what exactly can be the “traces” of life on Mars? 9 ICo on Mars, Pasadena, California, July 22-25, 2019, LPI Co. No. 2089, 6007.
87. Steklov A.F., Vidmachenko A.P., Miniailo N.F. (1983) Seasonal variations in the atmosphere of Saturn. *Soviet Astronomy Letters*. 9, Mar.-Apr., p. 135-136.
88. Tang G.H., Boak T.I.S., Grossi M.D. (1977) Bistatic radar measurements of electrical properties of the Martian surface. *J. Geophys. Res.* 82(28), p. 4305-4316.
89. Toulmin P.III., Baird A.K., Clark B.C., et al (1977), Geochemical and mineralogical interpretation of the Viking inorganic chemical results. *Journal of Geophys. Res.* 82(28), p. 4625-4634.
90. Vidmachenko A.P. (2000) Variations of the Reflective Characteristics of Jupiter's Atmosphere. 36th Annual Lunar and Planetary Science Conference, March 14-18, 2005, in League City, Texas #1060.
91. Vidmachenko A.P., Morozhenko A.V. (2005) Mapping of the physical characteristics and mineral composition of a superficial layer of the Moon or Mars and ultraviolet polarimetry from the orbital station. 36th Annual Lunar and Planetary Science Conference, March 14-18, 2005, in League City, Texas #1015.
92. Vidmachenko A. P. (2015) Seasons on Saturn. II. Influence of solar activity on variation of methane absorption. *Astronomical School's Report*. 11 (1), p. 15-23
93. Vidmachenko A. P. (2024) Another "parade" of the planets of the Solar system in 2024. In book: *Astronomical almanac*, 70, Edition: MAO NAS of Ukraine. Publisher: Kyiv, Akadempriodika, p. 190-193.
94. Vidmachenko A. P., Steklov A. F. (2022) Features of volcanic structures on Venus. Proceedings of the 9th International scientific and practical conference. Modern directions of scientific research development. BoScience Publisher. Chicago, USA. 23-25.02.2022. P. 195-204.
95. Vidmachenko A., Mozgovyi A., Steklov O. (2021) Specificity of long-term human settlements on Mars. *Astronomy and the present: materials of the 10th All-Ukrainian scientific conference*, April 12, 2021, Vinnytsia / ed.: V.F. Zabolotny, O.V. Mozgovyi. - Vinnytsia: LLC "TVORY", p. 60-61.
96. Vidmachenko A.P. (1985) Activity of processes in the atmosphere of Jupiter. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 1 (5), p. 101-102.
97. Vidmachenko A.P. (1987) Manifestation of seasonal variations in the atmosphere of Saturn. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 3(6), p. 9-12.
98. Vidmachenko A.P. (1994) Variations in the brightness of celestial objects in astronomical observations mount Maidanak. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies* 10 (5), 52-56.
99. Vidmachenko A.P. (2009) Planetary atmospheres. *Astronomical School's Report*. 6(1), p. 56-68.

100. Vidmachenko A.P. (2009) Research of the Mars by space vehicles. 11 ISCo AS YS, May 26-29, 2009, Kherson, Ukraine. P. 11-12.
101. Vidmachenko A.P. (2009) Research of the Mars by space vehicles. Astronomical School's Report. 6(1-2), p. 131-137.
102. Vidmachenko A.P. (2009) Water on Mars. Astron. almanac. 56, p. 225-249.
103. Vidmachenko A.P. (2014) Study of Earth-like planets. 16 International scientific conference Astronomical School of Young Scientists, held May 29-31, 2015, Kirovograd, Ukraine. P. 12-13.
104. Vidmachenko A.P. (2015) Dwarf planets (to the 10th anniversary of the introduction of the new class of planets). Astronomical almanac 62, 228-249.
105. Vidmachenko A.P. (2015) Seasons on Saturn. I. Changes in reflecting characteristics of the atmosphere at 1964-2012. Astronomical School's Report. 11 (1), p. 1-14.
106. Vidmachenko A.P. (2015) Seasons on Saturn. II. Influence of solar activity on variation of methane absorption. Astronomical School's Report 11 (1), 15-23.
107. Vidmachenko A.P. (2016) Activity of processes on the visible surface of planets of Solar system. 18 ISCo AS YS. Kyiv, Ukraine. May 26-27, 2016, p. 23-27.
108. Vidmachenko A.P. (2016) Activity of processes on the visible surfaces of Solar System bodies. Astr. School's Report 12 (1), p. 14-26.
109. Vidmachenko A.P. (2016) Activity of processes on the visible surface of planets of Solar system. 18 ISCo AS YS, Kyiv, Ukraine. May 26-27, 2016, p. 23-27.
110. Vidmachenko A.P. (2016) Activity of processes on the visible surfaces of Solar System bodies. Astr. School's Report 12 (1), p. 14-26.
111. Vidmachenko A.P. (2016) Activity of processes on the visible surface of planets of Solar system. 18 ISCo AS YS. Kyiv, Ukraine. May 26-27, 2016, p. 23-27.
112. Vidmachenko A.P. (2016) Is there life on Mars and where necessary to search for its traces. Astronomy and present: materials of 5 Interregional SCo, April 12, 2016, Vinnytsia, Ukraine. / Science editor A.V. Mozhovi. - Vinnytsia: FOP "NP Kostiuk". - 241 p. P. 43-48.
113. Vidmachenko A.P. (2016) Processes on the "young" Mars: possible developments of events. 18 ISCo AS YS, NAU, Kyiv, Ukraine, May 26-27, p. 16-17.
114. Vidmachenko A.P. (2016) Seasonal changes on Jupiter: 1. Factor of activity of the hemispheres. Kinematics and Physics of Celestial Bodies 32 (4), 189-195.
115. Vidmachenko A.P. (2016) The floating ices on the surface of Pluto. 18 ISCo AS YS, Kyiv, Ukraine. May 26-27, p. 10-12.
116. Vidmachenko A.P. (2016) Traces of life on Mars must be sought around the valley Hellas in areas where the water coming out from under the planet's surface. 18 International scientific conference Astronomical School of Young Scientists. Kyiv, Ukraine. May 26-27, 2016, p. 14-16.
117. Vidmachenko A.P. (2016) Where is Necessary to Search Traces of Life on Mars? Biosignature Preservation and Detection in Mars Analog Environments, Proceedings of a conference held May 16-18, 2016, in Lake Tahoe, Nevada. LPI Contribution No. 1912, id.2002.
118. Vidmachenko A.P. (2017) Where Should Search Traces of Life, Which Could Appear on Mars in the First 300 Million Years. Fourth International Conference on Early Mars: Geologic, Hydrologic, and Climatic Evolution and the Implications for Life. 2014. 3005.
119. Vidmachenko A.P. (2018) Comparative features of volcanoes on Solar system bodies. 20 International scientific conference Astron. School of Young Scientists, May 23-24. Uman, Ukraine, p. 9-12.

120. Vidmachenko A.P. (2018) Modern volcanic activity on the Moon. 20 International scientific conference Astronomical School of Young Scientists. May 23-24, 2018. Uman, Ukraine, p. 5-7.
121. Vidmachenko A.P. (2018) Water in Solar system. 20 International scientific conference Astronomical School of Young Scientists. May 23–24 2018. Uman, Ukraine, p. 91-93.
122. Vidmachenko A.P. (2019) Traces of life on Mars should be sought in emissions from the crater Hellas in places where water exits from under the surface. *New Trends in Astrophysics, Cosmology and HEP after Gamow*, p. 45.
123. Vidmachenko A.P. (2019) Traces of Martian Life Should be Sought in Places Around Hellas Crater, Where Water has Recently Spilled Out onto the Surface. Ninth International Conference on Mars, Pasadena, California, Jul 22-25, 2019, LPI Contrib. No. 2089, 6005.
124. Vidmachenko A.P. (2023) Comparison of features of impact and volcanic craters on the surface of Mars. *Proceed. of VIII Intern. Sc. and Pract. Conf. Progr. Res. m. w. (27-29.04.2023)*. Ch. 43. BoScience Publisher, Boston, USA, p. 237-246.
125. Vidmachenko A.P. (2023) Comparison of features of impact and volcanic craters on the surface of Mars. *Proceedings of VIII International Scientific and Practical Conference. Progressive research in the modern world (April 27-29, 2023)*. Chapter 42. BoScience Publisher, Boston, USA, p. 243-252.
126. Vidmachenko A.P. (2023) Coordinates and names of surface details on Mars. *Proceedings of VII ISPCo. Science and technology: problems, prospects and innovations. (April 13-15, 2023)*. 39, CPNPublishing Group, Osaka, Japan, p. 217-226.
127. Vidmachenko A.P. (2023) History of possible climate change on Mars. *Proceedings of VII ISPCo. Science and innovation of modern world. (23-25 March 2023)*. Chapter 54. Cognum Publishing House, London, United Kingdom, p. 336-345.
128. Vidmachenko A.P. (2023) Macrorelief of the surface of Mars. *Proceedings of XIV International Scientific and Practical Conference. Prospects for the development of science and the environment. (April 10-12, 2023)*. Chapter 7. Helsinki, Finland, p. 34-39.
129. Vidmachenko A.P. (2023) The atmosphere of Mars. *Proceedings of VI International Scientific and Practical Conference. Scientific research in the modern world. (April 6-8, 2023)*. Chapter 45. Perfect Publishing, Toronto, Canada, p. 283-293.
130. Vidmachenko A.P. (2023) Thermal properties of the surface of Mars. *Proceedings of VII International Scientific and Practical Conference. Progressive research in the modern world (March 29-31, 2023)*. Chapter 42. BoScience Publisher, Boston, USA, p. 243-252.
131. Vidmachenko A.P. (2023) Volcanoes of Mars. *Conference Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference «Theories of world science and technology implementation» (May 08-10)*. Chapter 2. Osaka, Japan, p. 13-19.
132. Vidmachenko A.P. (2024) A modern view of former rivers on Mars. *Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference. World science priorities (February 08 – 09, 2024)* Chapter Astronomy. Publisher: «World of Conferences». Vienna. Austria. P. 20-25.
133. Vidmachenko A.P. (2024) About the possibility of existence of liquid water on the surface of Mars under modern conditions. *Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference. The modern vector of the development of science (February 01 – 02, 2024)* Chapter Astronomy. Publisher: «World of Conferences». Philadelphia, USA. P. 25-30.
134. Vidmachenko A.P. (2024) About the possible redistribution of water ice between the polar caps. *Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference.*

- Innovative scientific research. 14-15 March 2024. Chapter Astronomy. World of Conferences, Toronto. Canada. P. 5-10.
135. Vidmachenko A.P. (2024) Comparison of "ancient" and modern hydrology of Mars. Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference. Scientific advances and innovative approaches. (11-12 January 2024). Publisher: «World of Conferences». Tokyo. Japan, p. 9-14.
136. Vidmachenko A.P. (2024) Dark holes on the surface of Mars are entrances to volcanic caves. Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference. Modern science: theoretical and practical view. (January 09-10, 2024). Publisher: SC. Scientific conferences. Madrid. Spain. P. 12-17.
137. Vidmachenko A.P. (2024) Dust storms on Mars. Proceedings of V International Scientific and Practical Conference. Topical aspects of modern scientific research. (25-27 January 2024). Chapter 43. CPN Publishing Group. Tokyo. Japan, p. 295-303.
138. Vidmachenko A.P. (2024) Features of the polar regions of Mars. Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference. Modern research in science and education. (February 8-10, 2024). Chapter 35. BoScience Publisher. Chicago, USA. P. 209-218.
- Vidmachenko A.P. (2024) Dark spots on the surface of Mars may be holes in the ceiling of ice caves. Scientific discussion. #85, p. 12-16.
- Vidmachenko A.P. (2024) Frozen water reservoirs of Mars. Slovak international scientific journal. #80. P. 4-8.
139. Vidmachenko A.P. (2024) Former riverbeds and recent water flows on the surface of Mars. Proceedings of VI International Scientific and Practical Conference. Topical aspects of modern scientific research (February 22-24, 2024) Chapter 22. CPN Publishing Group, Tokyo, Japan. P. 134-143.
140. Vidmachenko A.P. (2024) Frozen reservoirs of water under the surface of Mars. Sworld-Us Conference Proceedings. usc22-01, p. 73-78. Modern systems of science and education in the USA, EU and other countries '2024. No 22 on January 21, 2024. ProConference in conjunction with KindleDP. Seattle, Washington, USA. usc22-00-044, January 20-21, 2024. P. 73-78.
141. Vidmachenko A.P. (2024) Frozen water in the soil of Mars. Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference. The modern vector of the development of science (March 21–22, 2024). Chapter Astronomy. World of Conferences, Philadelphia, USA. P. 21-26
142. Vidmachenko A.P. (2024) Glaciology of Mars. About ice and lakes on Mars. In book: Astronomical almanac, 70, Edition: MAO NAS of Ukraine. Publisher: Kyiv, Ak.periodika, p. 180-189.
143. Vidmachenko A.P. (2024) Ice on the surface of Mars. Proceedings of VII International Scientific and Practical Conference. Global science: prospects and innovations (March 1-3, 2024). Chapter 50. Cognum Publishing House, Liverpool, United Kingdom. P. 320-329
144. Vidmachenko A.P. (2024) Large lake basins on Mars. Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference. Innovative scientific research (25-26 January 2024) Chapter Astronomy. Publisher: «World of Conferences». Toronto. Canada. P. 5-12.
145. Vidmachenko A.P. (2024) New generation telescopes for the astronomy of the future. In book: Astronomical almanac, 70, Edition: MAO NAS of Ukraine. Publisher: Kyiv, Akadempriodika, p. 204-209.
146. Vidmachenko A.P. (2024) Or maybe its not water? Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference. Scientific advances and innovative approaches (29 February-01 March 2024). Chapter Astronomy. World of Conferences, Tokyo. Japan. P. 11-17.

147. Vidmachenko A.P. (2024) Peculiarities of Martian hydrology. Sworld-US Conference Proceedings. usc22-01, p. 67-72. Modern systems of science and education in the USA, EU and other countries '2024. No 22 on January 21, 2024. ProConference in conjunction with KindleDP. Seattle, Washington, USA. usc22-00-004, January 20-21, 2024. P. 67-72
148. Vidmachenko A.P. (2024) Spots around the polar regions of Mars as seasonal "mini-volcanoes". Proceedings of the 6th International scientific and practical conference. Global science: prospects and innovations. (1-3 February 2024) Chapter 25. Cognum Publishing House. Liverpool, United Kingdom. P. 160-169.
149. Vidmachenko A.P. (2024) There is liquid water on the surface of Mars right now. Proceedings of V International Scientific and Practical Conference. Innovative development of science, technology and education (February 15-17, 2024) Chapter 42. Perfect Publishing, Vancouver, Canada. P. 267-276.
150. Vidmachenko A.P. (2024) Very "fresh" impact craters indicate frozen water in the surface layer of the soil. Slovak international scientific journal. #82, p. 4-8.
151. Vidmachenko A.P. (2024) Volcanic and ice caves on Mars. Proceedings of the 5th International scientific and practical conference. Modern research in science and education. (January 11-13, 2024). Chapter 76. BoScience Publisher. Chicago, USA. P. 440-449.
152. Vidmachenko A.P. (2024) Which caves are better suited for living on Mars? Proceedings of the 4th International scientific and practical conference. Innovative development of science, technology and education (January 18-20, 2024). Chapter 40. Perfect Publishing, Vancouver, Canada. P. 237-246.
153. Vidmachenko A.P. (2024) Which Caves on Mars are Safer to Live in? 55th Lunar and Planetary Science Conference, held 11-15 March, 2024 at The Woodlands, Texas/Virtual. LPI Contribution No. 3040, id.1028.
154. Vidmachenko A.P., Dlugach Z.M., Morozhenko A.V. (1984) Nature of the optical nonuniformity in Saturn's disk. Solar System Research. 17(4), p. 164-171.
155. Vidmachenko A.P., Hrudynin, B.O. (2024) Using Signals from FM Stations for Space Invasions Research. 55th Lunar and Planetary Science Conference, held 11-15 March 2024 at The Woodlands, Texas/Virtual. LPI Contribution No. 3040, id.1021.
156. Vidmachenko A.P., Klimenko V.M., Morozhenko A.V. (1981) Apparent spectral albedos of the disk of Mars in September-October 1977. Solar System Research. 14(4), p. 157-159.
157. Vidmachenko A.P., Morozhenko A.V. (2014) The study Earth-like planets using spacecraft. Ast. School's Rep. 10(1), 6-19.
158. Vidmachenko A.P., Morozhenko O.V. (2014) The physical characteristics of surface Earth-like planets, dwarf and small (asteroids) planets, and their companions, according to distance studies. MAO NAS of Ukraine, NULES of Ukraine. Kyiv, Publishing House "Profi". -388 p.
159. Vidmachenko A.P., Morozhenko O.V. (2019) Physical parameters of terrestrial planets and their satellites. Kyiv, Editorial and Publishing Department of NULES of Ukraine. - 468 p.
160. Vidmachenko A.P., Mozghovyi O.V., Steklov O.F. (2023) About volcanoes on Mars. Proceedings of 11 All-Ukrainian Scientific Conference "Astronomy and present day", April 12, 2023. Vinnytsia, Ukraine. LLC "TVORY", p. 76-81.
161. Vidmachenko A.P., Mozghovyi O.V., Steklov O.F. (2023) Features of the relief on the surface of Mars. Proceedings of 11 All-Ukrainian Scientific Conference "Astronomy and present day", April 12, 2023. Vinnytsia, Ukraine. LLC TVORY, p. 66-71.
162. Vidmachenko A.P., Mozghovyi O.V., Steklov O.F. (2023) Historical aspects of climate changes on Mars. Proceedings of 11 All-Ukrainian Scientific Conference "Astronomy and present day", April 12, 2023. Vinnytsia, Ukraine. LLC TVORY, p. 56-61.

163. Vidmachenko A.P., Mozghovyi O.V., Steklov O.F. (2023) Peculiarities of dust storms on Mars. Proceedings of 11 All-Ukrainian Scientific Conference “Astronomy and present day”, April 12, 2023. Vinnytsia, Ukraine. LLC "TVORY", p. 87-92.
164. Vidmachenko A.P., Mozghovyi O.V., Steklov O.F. (2023) Very "fresh" craters on the surface of Mars. Proceedings of 11 All-Ukrainian Scientific Conference “Astronomy and present day”, April 12, 2023. Vinnytsia, Ukraine. LLC TVORY, p. 71-76.
165. Vidmachenko A.P., Mozghovyi O.V., Steklov O.F. (2023) Volcanic caves of Mars and their suitability for colonists. Proceedings of 11 All-Ukrainian Scientific Conference “Astronomy and present day”, April 12, 2023. Vinnytsia, Ukraine. LLC "TVORY", p.81-87.
166. Vidmachenko A.P., Mozghovyi O.V., Steklov O.F., Grudynin B.O. (2023) Features of the relief of the surface of Mars caused by water. Proceedings of 11 All-Ukrainian SCo Astronomy and present day, April 12, 2023. Vinnytsia, Ukraine. LLC "TVORY", p. 113-118.
167. Vidmachenko A.P., Mozgovyi A., Steklov O. (2021) Specificity of long-term human settlements on Mars. Astronomy and the present. 10th All-Ukrainian SCo, April 12, 2021, Vinnytsia. p. 60-61.
168. Vidmachenko A.P., Steklov A.F. (2020) Mineral resources can be mined on different bodies of the Solar System. 22 International Astronomical School of Young Scientists. December 11-12, 2020. Kyiv, Ukraine, p. 89-92.
169. Vidmachenko A.P., Steklov A.F. (2020) Mineral resources can be mined on different bodies of the Solar System. 22 International Astronomical School of Young Scientists. December 11-12, 2020. Kyiv, Ukraine, p. 89-92.
170. Vidmachenko A.P., Steklov A.F. (2022) Features of volcanic structures on Venus. Proceedings of the 9th International scientific and practical conference. Modern directions of scientific research development. 29, p. 195-204.
171. Vidmachenko A.P., Steklov A.F. (2022) How long ago has water flowed on Mars surface? Results of modern scientific research and development. Proceedings of XI International Scientific and Practical Conference. Barca Academy Publishing, Madrid, Spain. 16-18.01.2022. P. 226-232.
172. Vidmachenko A.P., Steklov A.F. (2023) Microrelief of the Martian surface. Proceedings of the 8th ISPCo. Science and innovation of modern world. (April 20-22, 2023). Chapter 38. Cognum Publishing House, London, United Kingdom, p. 229-237.
173. Vidmachenko A.P., Steklov A.F. (2023) Microrelief of the Martian surface. Proceedings of the 8th ISPCo. Science and innovation of modern world. (April 20-22, 2023). Chapter 38. Cognum Publishing House, London, United Kingdom, p. 229-237.
174. Voosen P. (2018) Cliffs of ice spied on Mars. Science. 359(6372), p. 145.
175. Ward D.B., Gull G.E., Harwit M. (1977) Far-infrared spectral observations of Venus, Mars, and Jupiter. Icarus. 30(2), p. 295-300.
176. Wilson J.T., Vincent R., Massey R.J., et al. (2018) Equatorial locations of water on Mars: Improved resolution maps based on Mars Odyssey Neutron Spectrometer data. Icarus, 299, p. 148-160.
177. Wilson J.T., Vincent R., Massey R.J., et al. (2018) Equatorial locations of water on Mars: Improved resolution maps based on Mars Odyssey Neutron Spectrometer data. Icarus, 299, p. 148-160.
178. Zalewska N. (2017) Ice or Volcano - Interpretation of Pitted Martian Terrain. 48th Lunar and Planetary Science Conference. #2225.
179. Zimbelman J.R., Kieffer H.H. (1979) Thermal mapping of the northern equatorial and temperate latitudes of Mars. Journal of Geophys. Res. 84, p. 8239–8251.

Методичні вказівки

ВІДЬМАЧЕНКО Анатолій Петрович Фізичні параметри планети Марс і їх вплив на його освоєння

Національний університет біоресурсів і природокористування України
ІНІ енергетики, автоматики та енергозбереження
КАФЕДРА ФІЗИКИ
Головна астрономічна обсерваторія НАН України

Vidmachenko A.P. Physical parameters of the planet Mars and their influence on its development. The paper examines the main physical parameters of the planet Mars, the next planet from the Sun after the Earth. Due to the significant eccentricity of the orbit, the smallest distance between the Earth and Mars even in opposition (approximately every 780 days) varies from 55 to 101 million km. During ground observations, bright (called continents) and dark (seas) details are observed on the surface of Mars. The period of its rotation around the axis is $24^{\text{h}}37^{\text{m}}22.6679^{\text{s}}$. Very light polar caps are observed in the polar regions. Bright details of a condensed nature were also recorded on the disk of the planet, the photometric contrast of which increased as the wavelength λ decreased. In the long-wavelength part of the spectrum, darker details appeared, which were identified with dust. Depending on the season and time of day, the surface temperature varies from 293 K in summer near the equator to 120 K at the poles in winter. The work proposes places for astronauts to land and for the placement of the first settlements on a neighboring planet. In many countries, they are working on preparing the conditions for astronauts to live in order to then send them to this planet. Terraforming Mars means completely rebuilding its entire surface, climate, and atmosphere. However, this is a long and difficult process. Therefore, for now, it is proposed to create separate greenhouse farms. On the surface of Mars, radiation values are too high. Therefore, for the cultivation of plant food on Mars, it is proposed to use hydroponic greenhouse chambers, covered from the effects of radiation by mounds of soil, or hidden under the surface in lava caves.

A number of provisions of this book were considered during the implementation of the topic in NUBiP of Ukraine 110/6-pr-2022 "Development of electrophysical methods and biotechnical systems for diagnosing biological objects and managing plant productivity in greenhouses". The publication is intended for teachers of higher education institutions, students, postgraduates, and specialists who specialize in astronomy and for a wide range of interested parties.

Редактор

Підписано до друку

Ум. друк. арк. _____

Наклад _____ пр.

Формат 60 x 84 1/16.

Обл.-вид. арк. _____

Зам. № _____

Видавничий центр НУБіП України.
03041, Київ, вул. Героїв Оборони, 15.

