МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ім. Шевченка

Фізичний факультет, кафедра астрономії

**ДИПЛОМНА РОБОТА З ТЕМИ:**

**Вода на Марсі**

Виконала: студентка V курсу

Група 105 ФА

Туполець Оксана

Київ 2010

**Вступ**

Марс - четверта планета Сонячної системи; він міститься в півтора рази далі від центрального світила, ніж Земля. Така віддаленість є однією з причин того, що температура на поверхні Марса коливається (залежно від широти та часу доби) в межах від -100 °С до +27. Марсіанський рік триває 687 земних діб, доба практично дорівнює земній. Діаметр Марса удвічі менший за діаметр нашої планети. Сила тяжіння на марсіанській поверхні становить 0,4 земної. Планету покрито пісками червонуватого відтінку, за що вона й дістала назву Червоної. Незважаючи на те, що марсіанська атмосфера у 100 разів розрідженіша від нашої, на Марсі бушують сильні пилові бурі, які часом стають глобальними. Рельєф Червоної планети - це рівнини, метеоритні й вулканічні кратери, гори. Найвища гора зветься Олімп; її висота сягає 27 км. На Марсі є також велетенський розлом завдовжки близько 4 000 км і дві полярні шапки. Хімічний склад атмосфери такий: вуглекислий газ - близько 95%, невелика кількість азоту (близько 3%), аргону (приблизно 1,5%), кисню (0.15%). Концентрація водяної пари невелика, і вона суттєво змінюється залежно від сезону.

Однак є всі підстави вважати, що води на Марсі немало. На таку думку наводять системи долин протяжністю в сотні кілометрів, дуже схожі на висохлі русла земних річок, причому перепади висот відповідають напряму течій. Деякі особливості рельєфу явно подібні до вигладжених льодовиками ділянок. Оскільки ці форми добре збереглися (не встигли ні зруйнуватися, ні покритися дальшими нашаруваннями), то вони мають відносно недавнє походження - у межах останнього мільярда років. Давно були висловлені припущення, що вода на Червоній планеті існує й тепер, але як мерзлота. Це зумовлено тим, що на Марсі за дуже низьких температур будь-яка відкрита водна поверхня швидкої береться кригою, яку через короткий час засиплють пил і пісок. Вельми ймовірно, що внаслідок низької теплопровідності льоду під його товщею місцями може залишатись і рідка вода.

Повідомлення про воду на Марсі з'являються в украй суперечливих інтерпретаціях. Одні агентства оголошують, що «виявлено декілька водних басейнів», другі - що знайдено лише «ознаки води в пористих, скельних породах, котрі залягають на глибині декількох сотень метрів під поверхнею», треті - що «вперше вдалося виявити сліди наявності води і в наші дні на поверхні». І все ж на деяких фотографіях Марса, зроблених різними космічними апаратами, видно, що поверхня планети і тепер активно перетворюється. Так, на схилах великих каньйонів; і метеоритних кратерів чітко видно яри та вимоїни, біля підніжжя яких є характерні конуси, що зазвичай з'являються в результаті розмиву піщаних порід. Як і на Землі, для геологів усе це служить явним свідченням водної ерозії, причому, за багатьма ознаками, вода була там зовсім недавно, а можливо, і донині продовжує свою геологічну дію.

У 1877 р. італійський астроном Джованні Скіапареллі (1835-1910), спостерігаючи Марс у телескоп, виявив, що його поверхню ніби розкреслено прямими темними лініями, які вчений назвав каналами. Довгий час уважали, що їх створили розумні істоти. Згодом, коли з'явилися потужніші телескопи, астрономи з'ясували, що ніяких каналів немає, а є лише гірські хребти, розломи й інші природні деталі рельєфу, котрі здалеку спостерігач сприймає як прямі лінії. Таким чином, канали виявилися оптичним обманом, а разом із цим зазнала невдачі перша спроба знайти життя на Марсі. Проте пізніше на Червоній планеті були виявлені об'єкти, дуже схожі на висохлі русла річок. За однією з гіпотези мільйони років тому атмосфера на Марсі мала інший склад, була щільнішою й теплішою, а по планеті, можливо, текли річки. Отже, там могло існувати і життя (принаймні, у формі бактерій), яке після настання марсіанського «льодовикового періоду» сховалося від холоду, вітрів та ультрафіолетового випромінювання під поверхню. У всякому разі, деяке земні мікроорганізми змогли б вижити навіть за таких суворих умов.

У 1976 р. американські вчені спробували відповісти на питання щодо існування життя на Марсі, для чого здійснили ретельно продумані ну серію експериментів на поверхні Червоної планети. Ці досліди виконували прилади, розміщені на спускних апаратах двох космічних зондів «Вікінг», що були запущені 20 серпня та 9 вересня 1975 р. Зонд «Вікінг-1 після 10 місяців польоту вийшов на орбіту навколо Марса і ще через місяць, 20 липня 1976 р., висадився на марсіанську поверхню в області» Хриса. Умови в місці посадки спускного апарата виявилися досить суворими.

Рентгенівський флуоресцентний спектрометр передав попередні відомості про склад марсіанського ґрунту: 12-16% заліза, 13-15% кремнію, 3-8% кальцію, 2-7% алюмінію, 0.5-2% титану і т.д. Другий апарат висадився 3 вересня на Рівнині Утопія за 7 400 км від «Вікінга-1» і на 1 400 км ближче до північного полюса. Там умови виявилися майже такими ж. Основне завдання «Вікінгів» полягало в пошуку мікроорганізмів на Марсі. Тому в першу чергу всіх цікавили результати експериментів із забору й аналізу зразків грунту. Невдовзі, 31 липня, аналізатор газообміну «Вікінга-1» після двох годин інкубації показав 15-кратне збільшення вмісту кисню проти норми. Через 24 години концентрація кисню зросла ще на 30%, але потім стала знижуватися й через тиждень упала до нуля. У другому експерименті частину проби завантажили в резервуар із живильним бульйоном, у якому були радіоактивні атоми. Аналізатор детектував виділення газів і виявив збільшення вмісту двоокису вуглецю, причому майже таке, як і під час аналізу біологічно активних зразків земного фунту. Та незабаром і в цьому приладі рівень виділень упав майже до нуля. Третій експеримент був націлений на реєстрацію поглинання ізотопу вуглецю І4С можливими органічними сполуками марсіанського ґрунту. При цьому марсіанський вуглець І2С був замінений на радіоактивний І4С, а грунт був освітлений променями, подібними до сонячних. Такий експеримент проводили тому, що в земних умовах мікроорганізми дуже добре засвоюють вуглекислий газ. Пробу марсіанського ґрунту нагрівали, щоб виявити засвоєний радіоактивний вуглець С. Цей експеримент дав неоднозначний результат: вуглець то засвоювався марсіанським ґрунтом, то ні На «Вікінгу-2» виділення кисню зі зразків проходило набагато повільніше, ніж на «Вікінгу-1». Однак учені дійшли висновку, що ці результати не можна пояснити лише хімічними реакціями. Основний висновок, який вдалося зробити за результатами проведених експериментів, був такий: або кількість мікроорганізмів у місцях посадок «Вікінгів» мізерно мала, або їх там немає взагалі.

Оскільки з допомогою двох стаціонарних станцій «Вікінг», використовуючи біологічні аналізатори, не вдалося знайти ознак життя, то перед марсоходами «Спіріт» (Брігії) та «Опортьюніті» (Орропипігу) було поставлене завдання шукати сліди рідкої води, що залишилися в геологічних формаціях. Тепер умови на поверхні Марса такі, що вода в рідкому стані там існувати не зможе: вона замерзне й швидко випарується в холодній і надзвичайно розрідженій атмосфері. Разом з тим, з аналізу знімків, зроблених з борту штучних супутників Марса, на поверхні Червоної планети виявлено численні річкові русла, де раніше були притоки, острови, рукави й заводі. Це означає, що в минулому клімат там був інший, так що рідка вода могла текти по поверхні планети. Однак, для того, щоб «промити» річкове русло, досить і короткочасного викиду великої водної маси, а от для зародження життя потрібен вельми тривалий період вологого клімату. Саме тому марсоходи були націлені на пошук геологічних утворень, формування яких відбувалося за наявності водойм із тривалим часом існування. Такі сліди можуть свідчити про те, що колись потрібні умови для зародження життя на Марсі все-таки були.

З цієї причини марсоходи були спрямовані в такі райони, де сліди води можна було б відшукати з найбільшою ймовірністю. Так, «Спіріт» здійснив посадку в кратері Гусєва (15° південної широти, 185 західної довготи). Діаметр цього кратера - близько 180 км, він за розмірами як Аральське море. У кратер упадає русло давньої ріки, в якому тепер немає води. Вивчення знімків із супутників показало, що в минулому кратер Гусєва міг бути озером. Другий марсохід - «Опортьюніті» - опустився на плато Меридіана у кратері Ігль («Еаg1е» - так називався місячний модуль корабля «Аполлон-11» - першої експедиції людей на Місяць 1969 р.). Це місце розташоване майже на екваторі, на протилежному щодо кратера Гусєв боці Марса. У цьому районі, на основі спостережень із супутників, виявлено підвищену концентрацію гематиту - залізовмісного мінералу, який на Землі утворюється тільки у водному середовищі.

**1.** **ТЕОРІЯ РОЗВИТКУ ПОДІЙ НА МАРСІ**

Незважаючи на те, що період бурхливої вулканічної активності Марса вже в далекому минулому, з геологічного погляду планета все ще жива. Деякі знахідки дають змогу припустити, що на Марсі і тепер є місця вулканічної активності. Мова йде про відкладення, які характеризуються широким спектром найрізноманітніших мінералів - від украплень олівіну в базальтових породах до насичених кремнієм гранітів. Фізик Вінсент Чеврір (Уіпсепі Спеугіег) з Арканзаського університету (США) розрахував термодинамічні умови для утворення глинистих відкладень на Марсі та дійшов висновку, що вуглекислого газу в атмосфері планети могло бути недостатньо для парникового ефекту. Хоча є численні ознаки наявності в минулому і, можливо, тепер рідкої води на поверхні Марса, залишається неясним, що саме привело до підвищення температури й танення льоду на планеті. В. Чеврір узяв за основу своїх розрахунків склад глинистих мінералів, виявлених у найдавніших пластах, вік яких приблизно 4-4.5 млрд. років. Для утворення глини потрібна рідка вода: це доводять процеси, що відбуваються на Землі.

Для того, щоб сформувалася глина, вода має перебувати в рідкому стані досить тривалий час, а для того, щоб атмосфера могла утримувати сонячне тепло, в її складі має бути певна кількість так званого парникового газу. Найпоширенішим парниковим газом є вуглекислий газ. Проте, як відмічено вище, результати розрахунків В. Чевріра показали, що вуглекислого газу в марсіанській атмосфері могло бути недостатньо для істотного підвищення температури. До того ж, якби його було досить, то це зумовило б утворення, крім глин, ще одного мінералу - карбонату. Разом з тим, карбонати на Марсі довгий час не були виявлені.

Автоматична міжпланетна станція (АМС) «Марс-експрес» тепер завершила мінералогічне картографування поверхні Червоної планети. На підставі отриманих даних стало ясно, що великі об'єми відкритої води все ж могли існувати на планеті, хоча й дуже давно. Аналіз здобутої інформації показав, що геологічна історія Марса розділяється на три ери. Учені назвали їх за латинськими найменуваннями мінералів, котрі переважали впродовж відповідної ери.

Перша ера, філлоціанова (Phillocian), тривала 4.5-4.2 млрд. років тому. Вона характеризується утворенням глинистих силікатів (філлосилікатів), для чого було потрібне багате водою лужне середовище. Відповідно до нових наукових даних на Марсі виявлено тисячі місць із філлосилікатами, розташованими по всій поверхні. Шари порід, на які мільярди років тому вода мала певний вплив, лежать під молодшою вулканічною породою, але в багатьох місцях філлосилікати виходять на поверхню. Після глобальної зміни марсіанського клімату, викликаної, імовірно, вулканічною активністю, почалася нова ера - тейікіян (Theiikian), що тривала від 4.2 до 3.8 млрд років тому. Тоді в атмосферу надходила велика кількість сірки, а навколишнє середовище стало дуже кислим; вода та сірка, реагуючи, утворювали сульфати. Близько 3.8 млрд років тому настала третя ера - сідеріканська (Siderikan). Води на поверхні Марса не залишилося - вона збереглася як дві снігові шапки на його полюсах. У результаті цих процесів сформувалися залізні окисли, які не гідратуються. Наявністю саме їх зумовлений червоний колір поверхні планети. Учені встановили найбільш перспективні області для пошуку слідів життя на Марсі, які латиною подаються так: Terra Meridiani, Arabia Terra, Marwith Vallis, Syrtis Major і Nili Fossae. Саме в названих місцях можуть бути глинисті породи, де, можливо, зберігаються відбитки минулого життя.

Рівнина Еллада, розміщена недалеко від південної полярної області, являє собою басейн завширшки близько 2 000-3 000 км. У глибину кратер цього басейну звужується до 1 500 км. Його оточують викиди породи, через що він схожий на воронку від вибуху. Крім того, на поверхні рівнини спостерігаються аномальні збільшення сили тяжіння (так звані маскони), що свідчить про більшу щільність порід під ними. Дослідники звернули увагу на ланцюжок з п'яти велетенських кратерів: Аргір (Argyre), Еллада (Hellas), Ізіда (lsidis), Toмaзiя (Thaumasia), Утопія (Utopia), які лежать на одній дузі великого кола (координати його центра: 30° південної широти, 175° східної довготи) Особливості розташування й приблизно однаковий вік дали змогу припустити, що всі ці кратери утворилися одночасно в результаті одного й того ж катаклізму. Причиною його міг бути розпад і падіння фрагментів великого астероїда, який рухався навколо Сонця по тій же орбіті, що і Марс. Цей астероїд був істотно більшим від того, зіткнення з яким викликало загибель динозаврів на Землі. Унаслідок такого могутнього зіткнення марсіанські полюси змістилися приблизно на 90 і опинилися поблизу колишнього екватора. Розрахунки допомогли відновити параметри удару, завданого цим астероїдом Марсові. Ударна хвиля дісталася до протилежної півкулі, а сферична форма планети сфокусувала її симетрично до кратера Еллада. Саме там - на протилежному від нього боці - міститься група найвищих у Сонячній системі вулканів. З тієї ж причини відбулись і численні розломи кори. Водночас описані глобальні зіткнення вплинули на щільність марсіанської атмосфери й загальний клімат планети.

За розрахунками, до цієї події тиск атмосфери Марса міг досягати 300 мбар, тоді як тепер він не перевищує 10 мбар у найглибших місцях. У той час на Марсі могли існувати відкриті водойми, навіть річки, що впадали у великі моря, особливо в північних низинних областях. Правда, «океан» теперішньої північної півкулі мав розміщуватися в районі сучасного екватора. Це мало збільшити ексцентриситет марсіанської орбіти. У результаті такого радикального зсуву полярних і екваторіальних зон Марс за відносно невеликий проміжок часу позбувся майже всіх запасів води на поверхні, перетворившись на безводну пустелю. Свідченням цього можуть бути реліктові залишки стародавніх полярних шапок - темні області в екваторіальних широтах. Деякі з них, можливо, містять і в наші дні запаси льоду, приховані в надрах Марса. Після зникнення рідкої води з поверхні основним її джерелом стали полярні шапки. Якщо поклади льоду ще залишилися під поверхнею Червоної планети, то тепер їх треба шукати поблизу екватора.

**2. МАРСІАНСЬКА ГІДРОЛОГІЯ**

Марс, хоча й схожий тепер на пустелю, має досить складний гідрологічний цикл. На знімках з великої відстані видно північну й південну полярні шапки та глобальну систему хмар, яка оперізує тропіки планети, особливо, коли вона проходить афелій. У середніх широтах часом помітні ще хвильні атмосферні структури, аналогічні до тих, що їх породжують циклони й антициклони на Землі.

Згідно з недавніми кількісними оцінками, північна полярна шапка містить приблизно 1.2 млн км3 льоду. Це близько половини крижаного купола Гренландії або 4% від запасів води в антарктичному льодовику. Атмосферні запаси води на Марсі дуже малі. У такій холодній атмосфері, як марсіанська, де вдень температура рідко досягає 300 К, а вночі стає нижчою за 170 К, утримати помітну кількість водяної пари неможливо. Якщо всю водяну пару, що міститься в марсіанському повітрі, сконденсувати, то вийде плівка завтовшки декілька десятків мікронів. Ще один-два мікрони сконденсованої води міститься в хмарах. Здавалося б, за таких умов навіть розмови про гідрологію утрачають сенс, але насправді так званий кругообіг води цілком можливий і в такій слабкій атмосфері, як марсіанська. Марс - це найближча до Землі за основними кліматичними параметрами планета Сонячної системи. Саме на цьому природному полігоні можна відпрацьовувати кліматичну систему, подібну до земної. Розібратися в деталях марсіанського клімату означає глибше зрозуміти земний клімат і цим самим ще на крок просунутися в спробі визначити неодмінні й достатні умови для розвитку біосфери. Питання проте, куди поділася марсіанська вода, виникало ще в докосмічну епоху, коли потужність водозапасів північної полярної шапки 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 газово-пилового диску, то і кількість летких речовин, утому числі води, на Марсі й інших планетах земної групи має бути приблизно однаковою. Більше того, Марс як планета, близька за розміщенням до планет-гігантів, мав би бути навіть дещо збагаченим леткими елементами проти Землі. Це пов'язано з тим, що зона початкового формування Землі була тепліша від марсіанської зони. Такі ж міркування приводять до висновку, що і та частина гідросфери, котра була привнесена під час ударів кометних тіл на стадії інтенсивного бомбардування, для Марса мала б бути принаймні такою ж потужною, як і для Землі. Відомі тепер механізми втрати летких речовин (такі, як вибуховий парниковий ефект, що, ймовірно, привів до практично повної втрати води Венерою) вимагають великих потоків сонячного випромінювання, а тому на Марсі не могли реалізуватися. Чому ж тоді немає марсіанських океанів? Ще більше запитань виникло після аналізу зображень марсіанської поверхні, здобутих КА «Марінер-9», «Вікінг-1» і «Вікінг-2» в 1970-х pp. Рельєф планети виявився помереженим каньйонами, що схожі на висохлі русла річок, а в «гирлах»" великих рівнин були знайдені структури осадового походження, аналогічні шельфам та островам у дельтах річок (рис. 1).



Рис. 1

Такі фотознімки не могли не породити гіпотезу, яку вперше висловив Дж. Поллак з колегами, що близько 3.5 млрд. років тому на Марсі було тепло й волого, планету оповивала щільна атмосфера, текли річки та бушували океани [5]. Упродовж 1980-х і 1990-х pp. гіпотеза «теплого вологого раннього Марса» була явно панівною. Вона, проте, вимагала пояснення: а що ж відбулося згодом, яка кліматична катастрофа спіткала планету, перетворивши її на холодну, практично безводну й безповітряну пустелю? Цікаве рішення запропонував Р. Кан [4], пов'язавши процеси дисипації води й вуглекислого газу як основної складової атмосфери планети. Тепер атмосферний тиск на Марсі близький до потрійної точки води. Р. Кан припустив, що поки тиск перевищував цю величину, в атмосфері діяв один з відомих у геохімії циклів - карбонатно-силікатний, тепер достатньо активний на Землі. Він полягає в тому, що вуглекислий газ розчиняється в краплинах хмар, а потім осідає, переноситься в грунт і там бере участь у ланцюжкові реакцій, зумовлюючи врешті-решт відкладення карбонатів в осадових породах. У результаті тектонічних процесів карбонати дрейфують до мантії, де за відносно невеликих температур (~900 К) розкладаються. Вуглекислий газ, що вивільняється при цьому, з вулканічними викидами потрапляє знову в атмосферу. Гіпотеза Р. Кана має низку труднощів. Зокрема, якщо карбонати накопичувалися протягом тривалого часу, то вони й тепер мають бути в марсіанських породах. Проте дистанційні спостереження не виявили карбонатів на Марсі.

Багато дослідників указують, що марсіанські русла надто глибокі та надто прямі, щоб бути руслами річок у нашому звичному розумінні. Наприклад, глибина долини Ніргал - приблизно 1 км. Хоч вона й має нахил від витоку до гирла, рівнинні річки на Землі значно звивистіші, і це за майже втричі сильнішу гравітацію. Решта долин за кількісними характеристиками істотно відрізняється від земних річок. Але такі русла є достатньо близькими до долин в земних льодовиках. Можливо, саме льодовики відповідають за формування мережі каньйонів [3]. До того ж, знайдений у марсіанських породах гематит [2] свідчить про гідротермальну активність, причому у відносно недавню історичну епоху. Наявність такого мінералу може вказувати нате, що у товщі вічної мерзлоти є умови для утворення досить великої (завтовшки 30-100 м і діаметром до 10 км) лінзи рідкої води, яку підігріває локальна тектоніка. У деяких випадках лінза може перегрітися і навіть закипіти. Тоді витіснення води масою понад 1015 г на поверхню приведе до формування катастрофічного селевого потоку, який створить глибокий каньйон. Істотним є те, що в такому разі тектиме вже не рідка вода, а суміш грязі, льоду й пари, причому тектиме лише епізодично. Наскільки таким механізмом удасться пояснити реальний марсіанський рельєф, можна буде судити тільки на основі докладних чисельних розрахунків. Пошук води на Марсі визнано одним з найважливіших завдань усіх марсіанських експедицій. Крім того, що виявлення водних джерел на поверхні Марса мало б величезне значення для астробіології, здатність Червоної планети підтримувати життя подала б неоціненну підтримку тим ентузіастам, котрі закликають уряди Землі всерйоз задуматися над космічною експансією. Якщо на Марсі дійсно є досяжні джерела води, то здійснити такі програми було б набагато простіше.

Відзначмо, що сучасна марсіанська гідрологія - це не тільки палеоклімат і вічна мерзлота. Адже сучасний марсіанський гідрологічний цикл охоплює близько 1011 кг водяної пари в атмосфері, а також хмари, які добре помітно як світлий туман на зображеннях, отримуваних телескопом ім. Габбла. До того ж це сезонні полярні шапки й нічні тумани, що залишають на поверхні планети мікроскопічний шар інею. І нарешті - це «дихання» реголіту та глинистого фунту, роздробленого метеоритами впродовж мільярдів років. Хоч об'єм атмосферних запасів води відносно невеликий, 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. Яка причина такої асиметрії і чи має це який-небудь зв'язок із кліматичними катастрофами минулого? Є два погляди на можливі причини міжпівкульної асиметрії поверхневих запасів марсіанської води.

По-перше, геологічні властивості північної та південної півкуль теж помітно різняться. Поверхня північної півкулі залягає в середньому на 3-4 км нижче від південної, де тільки на дні найглибшої западини - Еллади - гравітаційний потенціал приблизно такий, як на північному полюсі. Крім того, північна півкуля світліша, оскільки там є більше осадових глинистих порід, що надають Марсу характерний червонуватий відтінок, і менше давніх базальтів. Глини, як відомо, здатні абсорбувати велику кількість води. Якщо глобальне переміщення води в атмосфері відіграє невелику роль у порівнянні з локальним обміном, то нерівномірний її розподіл між півкулями можна було б пояснити просто різною здатністю порід, які утворюють поверхню планети, підтримувати над нею певну кількість пари. У цьому разі можна було б чекати, що такий несиметричний розподіл води дуже давній, принаймні не молодший за більшість сучасних осадових порід, тобто йому близько мільярда років.

Згідно з іншою гіпотезою, яку висловили Кленсі й колеги [1], причиною асиметрії поверхневих запасів води є асиметрія зміни сезонів удвох півкулях, викликана помітним ексцентриситетом (*е*= 0.09) орбіти Марса. За таких умов модуляція сонячного потоку між афелієм (точкою максимального віддалення від Сонця) і протилежною точкою - перигелієм - досягає 40%. Тому тепер літо в північній півкулі довше й холодніше, ніж у південній. Нижча, ніж в перигелії, температура зумовлює конденсацію водяної пари в атмосфері на відносно невеликих висотах (менших за 10 км), тобто там, де домінують направлені до екватора повітряні потоки глобального конвективного переносу. На Землі такий перенос існує тільки в тропічних широтах і є причиною пасатних вітрів. Вище рівня конденсації вода не проникає через швидке гравітаційне осідання мікронних кристалів конденсату. Цей ефект приводить, зокрема, до утворення в афелії тропічного хмарного поясу, який замикає випаровувань полярною шапкою воду в північній півкулі. Водночас у перигелії (у набагато тепліший період часу) хмари слабко впливають на перенос між півкулями, і вода, що сублімує з південної полярної шапки, перемішується більш рівномірно. За геологічно короткий час такий сезонний «насос» цілком міг перекачати воду до тої півкулі, літо в якій припадає на проходження планетою афелія орбіти.

Ураховуючи, що нахил осі обертання планети міг багато разів змінюватися в циклах Міланковича з періодом приблизно 105 років, можна вважати, що описана вище асиметрія відносно молода і, можливо, ще змінює знак. Непрямою ознакою зміни півкуль у глобальному водному циклі служать концентричні шаруваті відкладення полярних шапок.

Вельми ймовірно, що впродовж марсіанської історії полярні шапки багато разів 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 погоджуються з другою гіпотезою, причому вважають, що інтенсивний локальний обмін є неодмінною умовою стабілізації глобального циклу, відіграючи роль дисипативого чинника. Якби марсіанський реголіт не «дихав», то сезонна міграція води до екватора була б неможливою, оскільки воду вмить би захоплювали «холодні пастки» на межі полярної шапки.

У 2005 p. американські вчені повідомили, що розгадали ще одну марсіанську загадку, з'ясувавши, чому саме південна полярна шапка Марса зміщена відносно його географічного південного полюса. Ця загадка турбувала дослідників ще з часів перших телескопічних спостережень Червоної планети. Щоб виявити механізми, які впливають на положення південної полярної крижаної шапки, учені використали зображення, отримані з орбітального апарата «Марс глобал сурвеєр» і комп'ютерні моделі клімату. Аналіз цієї інформації показав, що наявне зміщення є результатом дії двох марсіанських регіональних кліматичних зон, які розташовуються по обидва боки південного полюса. Першопричиною появи двох таких різних кліматичних зон уважають наявність двох величезних кратерів у південній півкулі Марса. Ландшафти цих кратерів породжують вітри, які створюють область низького тиску біля полярної шапки в західній півкулі. Таким чином, 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 й опади - сніг, котрий можна бачити як дуже яскраву зону на поверхні крижаної шапки. А в східній півкулі часто виникають умови для утворення своєрідної відлиги через теплішу погоду та відносну ясність. Саме це і є причиною східно-західної асиметрії форми південної полярної шапки Марса (рис. 2).

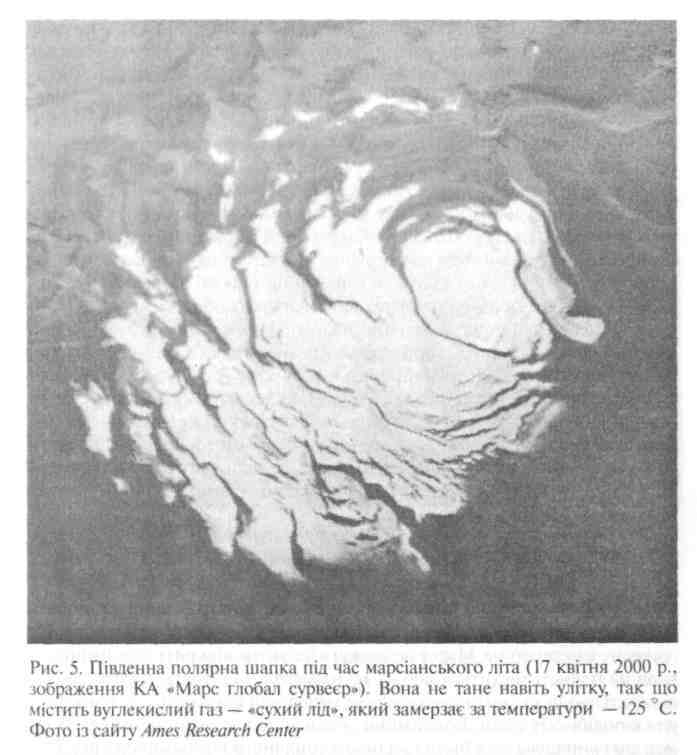


Рис. 2

**3. ЗАМЕРЗЛА ВОДА НА МАРСІ**

Сучасна величина тиску марсіанського повітря, який становить 0.006 тиску земної атмосфери, дещо менша від потрійної точки води. Це означає, що тепер на Марсі не можуть існувати відкриті водоймища, а вода на планеті міститься або як вічна мерзлота в товщі ґрунту, або як відкриті льоди та сніг, а також у дуже невеликій кількості - в атмосфері у газоподібному стані. Водоймище, якби воно існувало, неминуче б замерзло і випарувалося би під впливом сонячного випромінювання. Однак таких замерзлих водоймищ на Марсі немає, а єдиний відомий великий резервуар водяного льоду - це північна полярна шапка (рис. 3). Зазначмо, що південна полярна шапка складається головним чином із замерзлої вуглекислоти.

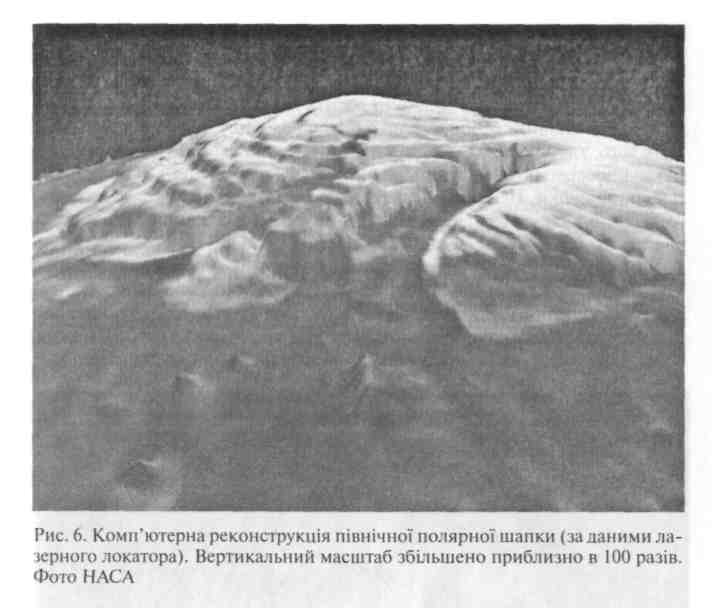


Рис. 3

Наукова інформація, передана з КА «2001 Марс-одіссея», свідчить про наявність на Червоній планеті великої кількості водяного льоду. На знімках Марса можна розгледіти контури каналів, заплав, навіть цілий океанський басейн у північній півкулі. Річкові русла на Марсі виявлено ще в 70-х pp. минулого століття. Учені припускали, що в періоди після катастроф Марс змінювався і протягом кількох десятиліть (щонайбільше століть) клімат ставав усе теплішим і вологішим; потім холод знову повертався - і так до наступного катаклізму. Доводом на користь катастрофічного походження наявного рельєфу є те, що виявлені річкові долини практично не мають анінайменших ознак приток, які впадають в головне русло. Це свідчить про те, що річки не були такими розгалуженими, як земні. Марс після кожної катастрофи неминуче знову охолоджувався, так що вода замерзала. Таким чином, зима на Марсі була майже нескінченна, її порушували тільки короткочасні періоди, коли йшли гарячі дощі та мали місце великі повені. І хоча Марс, можливо, не мав умов, сприятливих для виникнення білкових форм життя, проте він зможе надати своїм майбутнім колоністам цілком достатні запаси води, які збереглися у формі льоду. Марсіанський лід був знайдений у північній крижаній шапці, а пізніше - і під поверхневим шаром у південній півкулі. Тоді група фахівців з американського університету в Аризоні представила перше свідчення про наявність водяного льоду біля марсіанського південного полюса, використовуючи інформацію, здобуту інфрачервоною камерою на борту КА «2001 Марс-одіссея». Ті наукові дані дали аргументи на користь теорії, згідно з якою «сухий лід» лише зверху покриває поклади водяного льоду. При цьому в південній півкулі вуглекислий шар має бути досить тонким: запаси замерзлої води вдалося виявити безпосередньо під шаром пилу завтовшки 2-7 мм. Крім того, з допомогою гама-спектрометра знайшли велику кількість водню під поверхнею Марса в південній півкулі і на великих відстанях від полярної шапки. Цей водень, скоріш за все, входить до складу водяного льоду, а виявлені запаси води можуть бути всього лише «вершиною айсберга».

Докладні знімки поверхні Марса, які отримала орбітальна станція «2001 Марс-одіссея», дали змогу виявити відразу декілька «живих» льодовиків у середніх широтах, далеко за межами крижаних полярних шапок Червоної планети. На наведених нижче знімках (рис. 4) можна відмітити досить цікаву обставину: лінії уступів у долинах марсіанських льодовиків виглядають, на відміну від таких утворень на Землі, практично не пошкодженими і не розмитими. Учені пояснюють це тим, що на Марсі льодовики в основному не танули, як на Землі, а відразу ж перетворювалися в пару (сублімували) через дуже розріджену марсіанську атмосферу.



Рис. 4

На основі результатів дистанційного зондування Марса вчені Європейського космічного агентства (ЄКА) дійшли висновку, що запаси води на Червоній планеті, як і раніше, надзвичайно великі. Імовірно, вона зберігається у великих підземних резервуарах. Адже аналіз ерозійних процесів на поверхні Марса дає змогу припустити, що океан завглибшки в середньому 600 м міг покривати всю планету, а марсіанська атмосфера все ж містила достатньо двоокису вуглецю, щоб підняти середню температуру на планеті вище за 0° С. Нова спостережна інформація показує, що такий марсіанський океан упродовж усієї геологічної історії планети мав би втратити тільки декілька сантиметрів.

Наведені на рис. 5 зображення північної полярної шапки Марса вперше показують шари водяного льоду й пилу в перспективному уявленні. Тут можна виявити майже двокілометрові кручі, а також темнуватий матеріал у структурах, схожих на земні кальдери - казаноподібні западини з крутими схилами й рівним дном, що утворилися внаслідок провалу вершини вулкана, а іноді - і прилеглої до нього місцевості. Просторі області, покриті дюнами, можуть складатися з вулканічної золи. Поблизу марсіанського північного полюса «Марс-експрес» виявив цілі поля вулканічних конусів, причому деякі з них досягають висоти 600 м. Цілком імовірно, що їх можна вважати свідченням зовсім недавньої вулканічної діяльності на Марсі. Разом з тим питання про сучасну вулканічну діяльність на Червоній планеті все ще залишається відкритим.



Рис. 5

Одна з найбільших систем каналів на Марсі - долина Касея. Вона містить багато доказів льодовикової та річкової активності, що супроводжувала велику частину геологічної історії планети. Вимоїни на дні названої долини (її координати - приблизно 29 північної широти, 300° східної довготи) були зафіксовані з висоти 272 км. Сліди розмивання в долині найімовірніше виникли під впливом льодовикової, а не водної ерозії. Льодовик, що створив цю долину, живився водами каньйона Ехуса (рис. 9), яку знизу підігрівали вулкани. Ця вулканічна активність і зумовила появу великих потоків талої води зовсім недавно з геологічного погляду - 20 млн. років тому. Перспективне зображення каньйона Ехуса свідчить про те, що на поверхні Марса рідка вода була ще мільярди років тому. Пізніше, коли планета остигла, озера замерзли й сформували льодовики, які своїми потоками «порізали» долину Касея. Одним з доказів такої теорії є те, що дно «каналів» міститься нижче від гіпотетичного рівня марсіанського океану. Це неможливо для води, але здійснено для льоду.

Донедавна прямих доказів наявності води на Марсі виявити не вдавалося. І тільки влітку 2000 р. міжпланетна станція «Марс глобал сурвеєр» виявила на поверхні планети структури, які могли виникнути тільки під впливом потужних потоків води. А на початку осені того ж року на переданих з Марса фотознімках гірських масивів планети було зафіксоване величезне крижане озеро, під льодом якого може бути й вода. Цей висновок дав змогу зробити припущення, що вік вимоїн на крутих схилах марсіанських гір міг бути всього один-два роки. А 2003 р. на Марсі вперше виявлено карбонати - солі вугільної кислоти. Ці сполуки входять до складу восьми десятків земних мінералів, які становлять близько 2% маси кори нашої планети, а утворюються вони (карбонати) лише за наявності води й вуглекислого газу. Таким чином, це відкриття підкріпило гіпотезу, згідно з якою в далекому минулому на Марсі були великі запаси води.

Через чотири дні після того, як марсохід «Опортьюніті» знайшов на Марсі свідчення про наявність вологого середовища в камені, який учені назвали «Капітан» («El Capitan») (виявлено велику концентрацію сірки в солях магнію та заліза й інших сульфатах), його «колега» - марсохід «Спіріт» також досяг головної мети експедиції, виявивши сліди дії води в камені, який згодом дістав назву «Хемфрі» («Humphrey»). Проникши з допомогою свердла всередину каменя, «Спіріт» установив, що в ньому є порожнечі, які утворилися внаслідок дії води. Крім того, марсохід знайшов у цих порожнечах відкладення мінералів, які можуть утворюватися тільки за наявності води. Усі ці знахідки дали змогу вченим оголосити про те, що місії «Опортьюніті» та «Спіріт» є успішними.

Здавалося, що дослідники вже практично впевнилися - вода з Марса або зовсім випарувалася, або пішла під землю, і, можливо, відбулося це мільйони років тому, а може, й мільярди. Та після липня 2005 р. вченим знову довелося переглянути свої висновки. Саме тоді фахівці з ЄКА повідомили, що на Марсі виявлено замерзлу воду на відкритій поверхні планети (рис. 6). На фотознімку, зробленому з борту КА «Марс-експрес», у високих північних широтах планети був зареєстрований кратер з покладами льоду на дні. Температура й тиск у тому районі такі, що там не може бути твердого двоокису вуглецю - так званого сухого люду.



Рис. 6

Крижаний диск, добре видимий і досить чистий, лежить на дні кратера (діаметр його 35 км, глибина - близько 2 км), розташованого на рівнині Вастітас (Vastitas Borealis). На знімках виявлено також слабкі сліди льоду (іній) на краю кратера та на його стінках. Дослідження того ж 2005 р. верхніх шарів Червоної планети з допомогою радара «МАРСІС» (MARSIS - Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionospheric Sounding) на глибинах до кількох тисяч метрів виявили, що під поверхнею Марса є велика кількість води в замороженому стані. Найбільші скупчення льоду зафіксовано в полярних областях і в підземному кратері, розміщеному в середніх північних широтах у районі Хриса (Chryse Planitia). Наявність водяного льоду в грунті поблизу екватора можна пояснити дуже низькою теплопровідністю фунту, коли добове прогрівання досягає невеликої глибини.

Фахівці вважають, що неглибоко під тонким шаром пилу є велике замерзле море площею 800x900 км (рис. 7). Імовірно, що воно близько 5 млн років тому замерзло, а лід покрили пізніші відкладення.

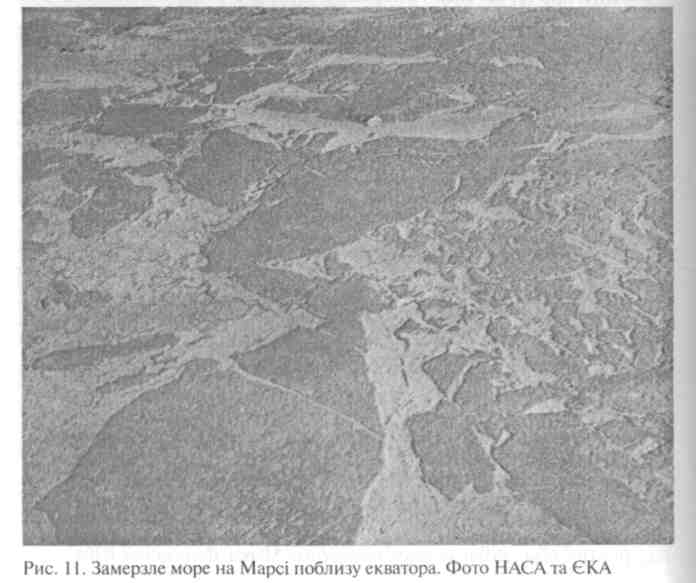


Рис. 7

**4. ПОТОКИ ВОДИ НА МАРСІ**

На основі вивчення знімків учені встановили зв'язок між вулканічною активністю та потоками води на Марсі. У результаті вулканічної діяльності лід під поверхнею планети може танути, а вода просочуватиметься назовні. Деякі з цих потоків мають досить молодий за геологічними мірками вік. Наприклад, біля підніжжя вулкана Олімп камери з орбітальних космічних апаратів виявили сліди потоків, які були там приблизно 30 млн. років тому.

Багато фотографій учені отримали завдяки зонду НАСА «Марс глобал сурвеєр» у 1999 та 2001 pp. Повторне повномасштабне знімання зробили 2004 р. та 2005 р. Аналіз наукових даних дав змогу виявити зміни, які могли б відбутися лише за участі води. Так, у вимоїнах були виявлені яскраво забарвлені відкладення, яких не було на раніше зроблених знімках. Ці відкладення - можливо, грязь, сіль або іній - залишилися від потоків води. Ми тепер розуміємо, що Марс геологічно активніший, ніж учені вважали раніше, і що ця активність зосереджена в середніх широтах.

І, нарешті, недавно були знайдені структури (не старші від кількох десятків років чи навіть декількох років), схожі на сліди рідкої води, що просочується з-під кори вічної мерзлоти. Характерно, що всі такі «джерела» виявлено на північних схилах глибоких каньйонів у північній півкулі та на південних схилах у південній півкулі, де атмосферний тиск хоч і ненадовго, але дає змогу зберегти воду від моментального холодного закипання. Тобто на фотографіях, зроблених різними КА, виявилося, що поверхня Червоної планети і тепер активно перетворюється і показує явні свідчення водної ерозії. Причому, за багатьма ознаками, вода була тут зовсім недавно, а можливо, і донині продовжує геологічну діяльність. Це означає, що вслід за відкриттям наявності води на Марсі у твердій фазі стає дуже вірогідним припущення про її наявність і в рідкій фазі. Зображення на знімках (рис. 8), зроблених 2005 р. зондом «Марс реконайсенс орбітер» у кратері в області Землі Сирен (Terra Serenum), дуже схожі на сліди рідини, яка тече. На знімку того ж кратера, зробленому іншим штучним супутником Марса шість років тому, такого потоку не було. Скоріш за все, це означає, що по поверхні Марса після 1999 р. протікала рідина.



Рис. 8

Саме після аналізу повторних (на інтервалі декількох років) знімків одних і тих же ділянок марсіанської поверхні були отримані найнадійніші свідчення того, що вода все ще іноді тече поверхнею Марса принаймні по двох територіях поверхні. На отриманих у 2004-2005 pp. фотографіях з КА «Марс глобал сурвеєр» містяться яскраві смуги з «гіллястими» закінченнями, характерними для так званих алювіальних потоків, яких ще не було на отриманих 1999 р. та 2001 р. зображеннях тих же місць. Адже така форма відкладень повністю відповідає перенесенню матеріалу проточною водою.

Дослідники вважають, що ця вода просочилася з тріщин, які виникли, наприклад, після падіння метеорита, котрий колись пробив один з численних «підземних резервуарів» рідкої води. Згідно з оцінками фахівців, кількість води, що витекла та встигла пройти сотні метрів, була еквівалентна приблизно вмісту п'яти-десяти плавальних басейнів. Показаний на рисунку схил розташований у південній півкулі Марса - приблизно на 37° широти, де денні температури влітку можуть інколи перевищувати 0° С. Тому наявність там води в рідкому стані цілком можлива. Крім пошуку змін на схилах учені також оцінили інтенсивність, з якою на поверхні Марса з'являються нові кратери ударного походження. Так, 98% марсіанської поверхні відзнято у 1999 р. і приблизно 30% поверхні планети сфотографовано ще раз 2006 р. Повторні зображення показали 20 нових кратерів (рис. 9) діаметром від 2 до 148 м. Ці дані особливо важливі для впевненого визначення віку різних утворень на поверхні Марса.

Була висунута гіпотеза, що показані на рис. 9 жолоби сформовані потоками води з каменями й піском - чимось на зразок селів. Багато з цих виносів мають жолоби, які свідчать, що по них текла рідина, імовірно, вода.

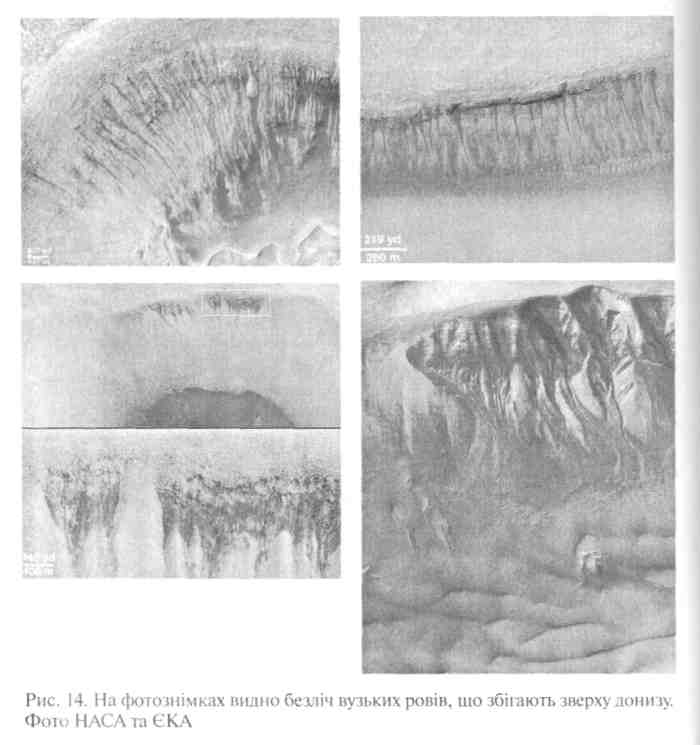


Рис. 9

Потрібні були сотні епізодів сходження селів для того, щоб утворити показану на знімках картину. Кожен такий прорив води у верхній частині схилу веде до процесів, під час яких конкурують випаровування (кипіння), замерзання та сила тяжіння. Індивідуальні виноси, зображені на цих знімках, були використані для приблизної оцінки мінімальної кількості води, потрібної для утворення їх. Це було зроблене за умови, що потоки подібні до земних селів, у яких вода становить 10-30%. Для оцінювання об'єму виносу взяли приблизну величину їхньої товщі - 2 м. За таких умов мінімальна кількість потрібної води близька до 2.5 млн. літрів.

На знімках 2008 р. з КА «Марс реконайсенс орбітер» зареєстровано в кратері Вернал (Vernal) в області Землі Арабії (Arabia Terra) горби, схожі на джерела. Вони цілком можуть бути давніми гідротермальними джерелами, якщо взяти до уваги їхню невелику висоту й еліптичну форму. На Землі вражаюче схожими на них об'єктами є гарячі джерела в Австралії.

Таким чином, отримані останнім часом спостережні дані показують, що й сьогодні Марс є геологічно активним небесним тілом. Вода на цій планеті суттєво впливає на формування рельєфу її поверхні. І запаси води мають бути досить великими.

**Література**

1. Clancy R.T.; Grossman А.; Wolff M.J.; James P.B.; Rudy D.J.; Billawala Y.N.; Sandor B.J.; Lee S.W.; Muhleman D.O. Water vapor saturation at low altitudes around Mars aphelion: a key to Mars climate? // Icarus.- 1996.- 122.**-** P. 36-62.
2. Goldspiel J.M., Squyres S.W. Groundwater sapping and valley formation on Mars // Icarus.- 2000. - 148.- P. 176-192.
3. Hoffman N. White Mars: a new model for Mars' surface and atmosphere based on C02 // Icarus. - 2000. - 146.- P. 326-342.
4. Kahn R. The evolution of C02 on Mars // Icarus.- 1985.- 62.- P. 175-190.
5. Pollack, J.B., Kasting J.B., Richardson S.M., Poliakoff K. The case for a wet, warm climate on early Mars // Icarus.- 1987.- 71.- P. 203-224.