

ОСОБЛИВОСТІ АТМОСФЕРИ МАРСА

Анатолій Відьмаченко – д-р. фіз.-мат. наук, професор

Олександр Мозговий – канд. техн. наук, доцент

Олексій Стеклов – канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співробітник

Юліана Кузнєцова – наук. співробітник

Помітний вплив на спостереження Марса здійснює розріджена атмосфера планети. Вона містить понад 95% CO₂, до 3% азоту, 1.6% аргону, С (0.06%), H₂O (до 0.1%). На Марсі можна спостерігати різні форми хмар і туманів. В міру піднімання охолодженого повітря на підвищені плато, хмари з'являються над високими горами. Взимку полярні шапки також огортають тумани. Великий вплив на формування клімату має атмосферний аерозоль. Важливу роль при еволюції атмосфери грала й атмосферна дисипація. Хмари водяного льоду і пилу зареєстрували над областями Фарсіда, Еллада та над кількома вулканами.

Ключові слова: Марс, атмосфера, зміни клімату Марса, туман і хмари, вода на планеті.

Марс обертається по орбіті з великою піввіссю 1.524 а. о. та ексцентриситетом 0.093. По цій причині мінімальна відстань між Землею і Марсом у протистояння (тобто кожні 770-790 днів) міняється від 55 до 101 млн км. Тому умови спостереження з поверхні Землі залежать від того, наскільки він близький до перигелію, чи афелію. Тривалість року становить майже 687 земних діб. Оскільки орбіта Марса знаходиться зовні земної, то при наземних спостереженнях інтервал зміни фазового кута обмежений □□□□□□□□. Тому в періоди протистоянь Марс можна спостерігати упродовж усієї ночі. При наземних спостереженнях на поверхні Марса спостерігаються світлі (материки) і темні (моря) деталі. За їх спостереженнями було визначено період прямого обертання планети навколо осі: 24^h37^m22.6679^s. У полярних районах спостерігаються ще й дуже світлі області зі змінною в часі площею. Їх називають полярними шапками. При наземних спостереженнях на диску Марса реєструвались і короткоживучі деталі. Одні з них спостерігались над материками. Їх фотометричний контраст збільшувався зі зменшенням довжини хвилі λ. Тому їм приписали конденсаційну природу. Інші – проявлялися над морями у довгохвильовій ділянці спектра. Їх ототожнили з пиловими хмарами, час життя котрих також обмежувався днями. Проте під час протистоянь розміри хмар починали швидко збільшуватись. І через короткий час вони вже закривали практично всю поверхню непрозорим шаром. Досить помітний вплив на формування поверхні Марса здійснює розріджена атмосфера планети [3, 8, 19]. Марсіанська атмосфера містить понад 95% вуглекислого газу, до 3% молекулярного азоту й 1.6% аргону, С (0.06%), H₂O (до 0.1% й істотно змінюється залежно від сезону). Кисень присутній у вигляді незначних слідів. Атмосферний тиск біля поверхні становить близько 6 мбар і лише у найглибших западинах планети інколи досягає 12 мбар. Однак сильні атмосферні вітри викликають потужні пилові бурі, які іноді охоплюють всю планету і піднімають пил на висоту до 20 км.

На Марсі спостерігаються різні форми хмар і туманів [18]. Вранці туман згущається у долинах. А в міру того, як вітри піднімають поступово охолоджені повітряні маси на підвищені плато, хмари з'являються навіть над високими горами (Рис. 1, ліворуч). Взимку північна полярна шапка також огортається туманом [17]. Подібне явище у трохи менших масштабах спостерігається й на південному полюсі. Полярні області покриті тонким шаром льоду, що є сумішшю водяного льоду й твердої вуглекислоти. Зображення з високим ступенем просторової роздільної здатності [9] показують спіральні утворення й страти від нанесеної вітром речовини. Полярні крижані шапки збільшуються та

зменшуються у відповідності зі зміною пір року. В атмосфері на висоті близько 38 км є слабкий озоновий шар товщиною до 10 км. Він у сотні разів менш потужний від земного. На висоті ≈ 300 км основною складовою атмосфери є атомарний кисень. Його наявність пояснюють фотодисоціацією вуглекислого газу. Адже густина вуглецю С з висотою падає швидше, ніж густина кисню. Починаючи з висоти ≈ 400 км переважним компонентом марсіанської атмосфери стає атомарний водень з концентрацією ≈ 10 тис. атомів в 1 см^3 . Там присутня майже така ж кількість гелію. А на висотах від кількох тисяч до 20 тис. км атмосфера складається практично з чистого водню, утворюючи своєрідну «корону» планети.

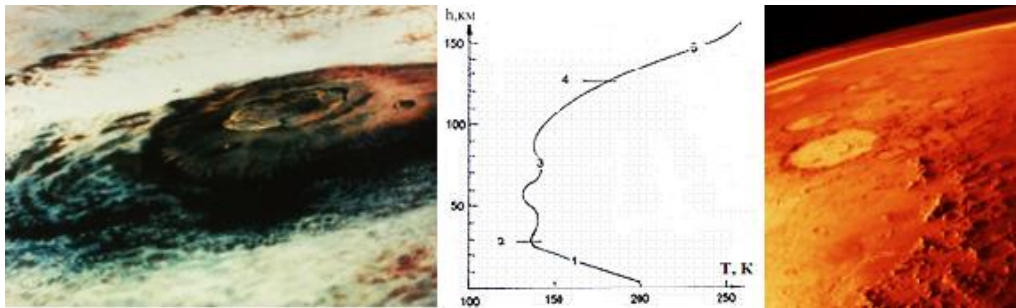


Рис. 1. Ліворуч – на фото з орбітального блоку «Вікінг» видно хмари навколо вулкану Олімп. Посередині – температурний профіль осінньої атмосфери Марса на помірних широтах в N-півкулі: 1 – тропосфера, 2 – тропопауза, 3 – мезосфера, 4 – гомопауза, 5 – термосфера. Праворуч – зображення з космічного апарату (КА) «Вікінг» показує тонку марсіанську атмосферу над областю Argyre (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>)

У багатьох місцях біля поверхні Марса тиск близький до так званої потрійної точки води: 6.1 мбар [1]. За таких умов на сучасному Марсі відкриті водойми існувати не можуть. Однак вода на планеті є. Адже там знайдено сліди водяної [10] пари в атмосфері, адсорбовану реголітом воду, кристалізовану воду в породах, водяний лід у полярних шапках, у вічній мерзлоті навіть поруч з екватором, солі різного складу й витoki рідкої води із ґрунтових пор на схилах деяких кратерів у тепліших областях у теплий час доби і т. п. І хоча вода на Марсі переважно прихована, її роль у сучасному стані планети досить значна. Адже, за певних умов вона 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 зовнішніх шарів планети товщиною до 10 км. Це завдання найкраще буде вирішуватися за допомогою геофізичних вимірювань «in situ» (сейсмозв'язка, електромагнітне зондування, вимірювання теплового потоку, буріння) і довгохвильової радіолокації з орбітального супутника. Зараз прогнозується, що запас води на Марсі може становити від 100 до 500 м при умові, що рівномірний шар води укріє всю планету. У даний час значна по масі частка марсіанської атмосфери проходить восени через процеси конденсації і випаровування (навесні) двоокису вуглецю у сезонних полярних шапках. Це супроводжується суттєвим меридіональним переносом. Зараз доволі значна кількість двоокису вуглецю не бере участі у сезонних процесах, тому що не встигає, очевидно, випаруватися в північній полярній шапці. А інша частина CO_2 є адсорбованою реголітом.

На Марсі, як і на Землі, великий вплив на формування клімату має атмосферний аерозоль [4, 5]. Періодично, під час проходження Марсом перигелію, цей вплив різко підсилюється. Часто у цей період виникають глобальні пилові бурі [12]. І перенос пилу вітром відіграє значну роль на планеті. Загальний характер будови атмосфери Марса показано на Рис. 1 (посередині). Однак у цілому, наявна кількісна інформація поки все ще недостатня для створення повноцінної моделі загальної циркуляції. Відсутність сучасних океанів [13, 16] на Марсі робить його трохи простішим і дуже корисним об'єктом для

розв'язання завдань такого роду. Для марсіанської атмосфери вивчаються такі характеристики, як її циркуляція, меридіональний перенос із сезонною зміною напрямку, планетарні хвилі у півкулях, внутрішні гравітаційні хвилі, вітри на схилах, теплові припливи. Дослідження в області динаміки марсіанської атмосфери повинні: 1) описати часово-просторову структуру загальної циркуляції тонкої атмосфери (Рис. 1, праворуч); 2) пояснити кількісно зв'язок цієї структури із зовнішніми факторами, такими як розподіл нагрівання й охолодження в глобальному масштабі [6, 7], швидкістю обертання, властивостями поверхні (рельєф, альbedo, тепла інерція); 3) знайти зв'язок цих факторів з переносом пилу й легких атмосферних складових, і, нарешті, з еволюцією клімату. Серед факторів, що впливають на еволюцію атмосфери значну роль відіграють процеси у верхній атмосфері, та взаємодія планети з сонячним вітром. Така взаємодія залежить від величини власного магнітного поля планети [11]. Сонячний вітер індукує магнітні поля в іоносфері, і, отже, необхідно знати їх структуру й поведження з часом для того, щоб дослідити власне магнітне поле Марса. Одночасно з магнітними вимірюваннями необхідно визначати різні характеристики іоносфери й перехідної зони, такі як концентрація й потоки частинок, температуру на різних висотах, а також властивості нейтральної верхньої атмосфери, її хімічний склад і висотну залежність температури. Цілком очевидно, що марсіанська атмосфера еволюціонувала. За деякими уявленнями червоний колір Марса має причиною оксиди заліза, що виникли в результаті його зіткнення з астероїдом, що утворив гігантську область Еллада [15]. Нескладні математичні викладки дозволяють оцінити можливі розміри такого астероїда. Згідно оцінкам масу кисню на Марсі вважають рівною $1.63 \cdot 10^{17}$ кг. Для хімічного зв'язування такої кількості кисню в тверду речовину через процес окислення в окисел заліза буде потрібно атомарного заліза $4.27 \cdot 10^{17}$ кг. Якщо вважати, що астероїд мав форму кулі і складався лише із заліза, то його діаметр, з урахуванням діаметра кратера Еллада, мав бути рівним близько 50 км. Гарячі випари заліза, що утворилися при вибуху, могли розлетітися на величезну відстань і зв'язати значну частину кисню колишньої атмосфери Марса.

Важливу роль при еволюції атмосфери [14, 20] грала й атмосферна дисипація. Водень утікав унаслідок теплової дисипації, а азот, кисень і вуглець могли втрачатися в результаті дії різних механізмів нетеплової дисипації. До них належать, наприклад, дисоціативна рекомбінація, захоплення іонів сонячним вітром і вимітання нейтралів захопленими іонами тощо. Для вивчення еволюції атмосфери необхідно вивчати ці процеси при проведенні прямих вимірювань у верхній атмосфері. Наприклад, атоми водню з верхньої атмосфери Марса повинні були б давно дисипувати у міжпланетний простір. Тому, через їх наявність у сучасній атмосфері планети, і зараз повинне існувати безперервно діюче джерело їхнього поповнення. Із загальних уявлень, основним таким джерелом може бути лише дисоціація водяної пари у шарах марсіанської атмосфери поруч з поверхнею. Тобто навіть тієї невеликої кількості пари H_2O , що є там зараз, цілком достатньо для цієї мети. КА «Вояджер» уперше виявив в атмосфері планети хмари з рідкого аерозолу. Вміст H_2O в атмосфері Марса складає лише десятки мікронів осадженої води. Сезонні і добові варіації водяної пари знаходяться в межах 1-100 мкм. Взимку – атмосфера є практично «сухою». Водяна пара з'являється в ній навесні і до середини літа її кількість досягає максимального значення, слідує за змінами температури поверхні. Протягом періоду літо-осінь водяна пара поступово перерозподіляється; причому максимум її вмісту переміщується від північної полярної області до екваторіальних широт. При цьому загальний глобальний вміст пари в атмосфері за даними КА «Вікінг-1» залишається приблизно постійним і еквівалентним 1.3 км^3 льоду. Максимальний вміст H_2O (100 мкм осадженої води) був зафіксований влітку навколо північної полярної шапки. Саме в цю пору року вода в атмосфері над льодом полярної шапки близька до насичення.

Утворення конденсаційної природи, що періодично появляються в атмосфері Марса, в основному представлені білими хмарами і 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 переважно утворюються в результаті конденсації CO₂. Такий же процес відповідальний за формування й приповерхневих серпанків у полярних областях. Інфрачервоні спектри цих хмар, отримані з допомогою космічних апаратів, свідчать про те, що ці хмарні утворення переважно складаються з кристалів водяного льоду. Як правило, такі водяні хмари формуються над марсіанською поверхнею на висотах менше 20 км.

Відмічено, що такі хмари утворюються при піднятті повітряних мас по схилах крупних форм рельєфу. Вони також поширені поблизу зимових полярних шапок, коли температура атмосфери опускається нижче точки замерзання CO₂ (147 К). Полярні хмари розташовані на висоті менше 10 км над поверхнею і є тонкими утвореннями з льоду H₂O в літній період і CO₂ взимку. Але навіть вся атмосферна волога при випаданні на поверхню, покрила б її шаром до 10 мкм. В низинах і на дні кратерів у холодний час доби також часто стоять тумани (Рис. 2, ліворуч). Вони складаються з водяного льоду. Прилади на КА «Вікінг-2» в 1979 р. зареєстрували випадання снігу, який пролежав на поверхні кілька місяців (Рис. 2, праворуч).

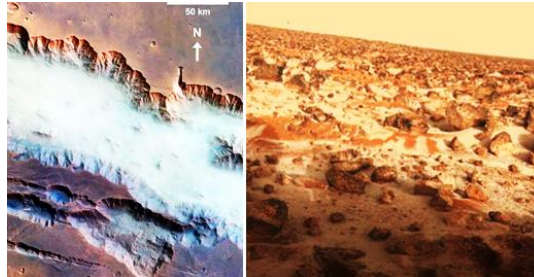


Рис. 2. Зображення ліворуч показує туман з водяного льоду в області Noctis Labyrinthis; праворуч – сніг на поверхні у місті посадки «Вікінга-2» у травні 1979 р. (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>)

За даними з планетним Фур'є спектрометром на КА «Марс-Експрес» у кінці марсіанського літа у південній півкулі вперше було отримано розподіл хмар водяного льоду і пилу над областями Фарсіда і Еллада. Вдалось зареєструвати достатньо високий вміст однорідно перемішаного пилу на широтах <70°. Такі ж хмари спостерігалися й у північній полярній області над вулканом Олімп, областями Ascraeus Mons і Alba Patera. Наявність хмар була підтверджена і прямими зображеннями поверхні Марса. Ефективний радіус частинок у хмарах оцінено в 1-3 мкм; їх візуальна оптична товща – була рівна 0.2-0.4 над горою Олімп і 0.1-0.6 над областю Ascraeus Mons. Хмари з водяного льоду спостерігалися на південному схилі Ascraeus Mons з максимальною оптичною товщиною над вершиною вулкана. А над горою Олімп хмари були знайдені по обидва боки від вершини [2].

Список використаних джерел:

1. Carr M.H. (1999) Retention of an atmosphere on early Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 104(E9), p. 21897-21909.
2. Grassi D., Formisano V., Forget F., et al. (2007) Fourier spectrometer (PFS-MEX). *Planetary and Space Science*. 55(10), p. 1346-1357.
3. Kahn R. (1985) The evolution of CO₂ on Mars. *Icarus*. 62(2), p. 175-190.
4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. Vidmachenko A.P. (1987) Manifestation of seasonal variations in the atmosphere of Saturn. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 3(6), p. 9-12.

8. Vidmachenko A.P. (2009) Planetary atmospheres. *Astronomical School's Report*. 6(1), p. 56-68.

9. Vidmachenko A.P. (2009) Research of the Mars by space vehicles. 11 ISCo AS YS, May 26-29, 2009, Kherson, Ukraine. P. 11-12.

10. Vidmachenko A.P. (2009) Water on Mars. *Astronomical almanac*. 56, p. 225-249.

11. Vidmachenko A.P. (2012) The magnetic field of planets, satellites and asteroids. *Astronomical School's Report*, 8(1), p. 136-148.

12. 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.

13. Vidmachenko A.P. (2016) Is there life on Mars and where necessary to search for its traces. *Astronomy and present: materials of 5 ISCo*, April 12, 2016, Vinnytsia, Ukraine. / Science editor A.V. Mozhovi. - Vinnytsia: FOP "NP Kostiuk". - 241 p. P. 43-48.

14. Vidmachenko A.P. (2016) Processes on the "young" Mars: possible developments of events. 18 ISCo AS YS, Kyiv, Ukraine, May 26-27, p. 16-17.

15. 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 ISCo AS YS. Kyiv, Ukraine, May 26-27, p. 14-16.

16. 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.

17. Vidmachenko A.P. (2018) Water in Solar system. 20 ISCo AS YS, May 23-24 2018. Uman, Ukraine, p. 91-93.

18. Vidmachenko A.P., Morozhenko A.V. (2014) The study Earth-like planets using spacecraft. *Astronomical School's Report* 10 (1), 6-19.

19. 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 of Ukraine, NULES of Ukraine. Kyiv, Publishing House "Profi". -388 p.

20. 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.

FEATURES OF THE MARTIAN ATMOSPHERE.

Anatoliy Vidmachenko – Doctor of Science, Professor

Oleksandr Mozhovi – PhD, Associate Professor

Oleksii Steklov – PhD, Senior Research Fellow

Juliana Kuznetsova – Research Fellow

Observations of Mars are significantly affected by the rarefied atmosphere of the planet. It contains more than 95% CO₂, up to 3% nitrogen, 1.6% argon, C (0.06%), H₂O (up to 0.1%). Different forms of clouds and fog can be seen on Mars. As the cooled air rises to higher plateaus, clouds appear over high mountains. In winter, polar caps are also covered by fog. Atmospheric aerosol has a great influence on climate formation. Atmospheric dissipation also played an important role in the evolution of the atmosphere. Clouds of water ice and dust were registered over the regions of Farsida, Hellas and over several volcanoes.

Key words: Mars, atmosphere, climate changes of Mars, fog and clouds, water on the Mars.