

## ОСОБЛИВОСТІ ПИЛОВИХ БУР НА МАРСІ

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

**Олександр Мозговий** – канд. техн. наук, доцент

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

*Весна на Марсі є часом зародження пилових бур у відповідній півкулі. Вони виникають тоді, коли починає випаровуватися замерзлий вуглекислий газ із зимових полярних шапок. При цьому збільшується атмосферний тиск при сублімації замерзлого CO<sub>2</sub>; між покритою вуглекислотною памороззю і тільки що відтануваючою поверхнею у щільнішій атмосфері пил легше піднімається і довше тримається. Встановлення високого температурного контрасту приводить до виникнення сильних вітрів, які дмуть від країв полярної шапки у бік середніх широт. Пилові бурі відіграють важливу роль на формування марсіанського клімату.*

**Ключові слова:** Марс, атмосфера, зміни клімату Марса, пилові бурі, антипарниковий ефект.

Марс – наступна від Сонця після Землі планета. Ексцентриситет орбіти Марса  $e=0,0933$  і тому відстань від Марса до Сонця змінюється від 207 млн км у перигелії до майже 250 млн км в афелії [19]. Умови спостереження Марсу з поверхні Землі залежать від того, наскільки близький він до перигелію, чи афелію [3, 6]. Якщо момент протистояння припадає на перигелій Марса і афелій Землі, то відстань між планетами буде найменшою (до 56 млн. км). І таке протистояння називають великим. При протистояннях, коли Марс перебуває в афелії, а Марс у перигелії – відстань між ними сягає 101 млн. км. Тривалість року на Марсі (сидеричного періоду) становить 686.98 земної доби [12, 20]. Як і всі зовнішні планети, Марс на небі Землі видний найкраще саме у періоди протистоянь. Інколи він може бути навіть яскравішим від Юпітера. Весна в обох півкулях Марса – є часом зародження пилових бур у відповідній півкулі [7]. Вони виникають тоді, коли починає випаровуватися замерзлий вуглекислий газ із зимових полярних шапок. В цей час вони, зазвичай, тягнуться аж до середніх широт (Рис. 1).

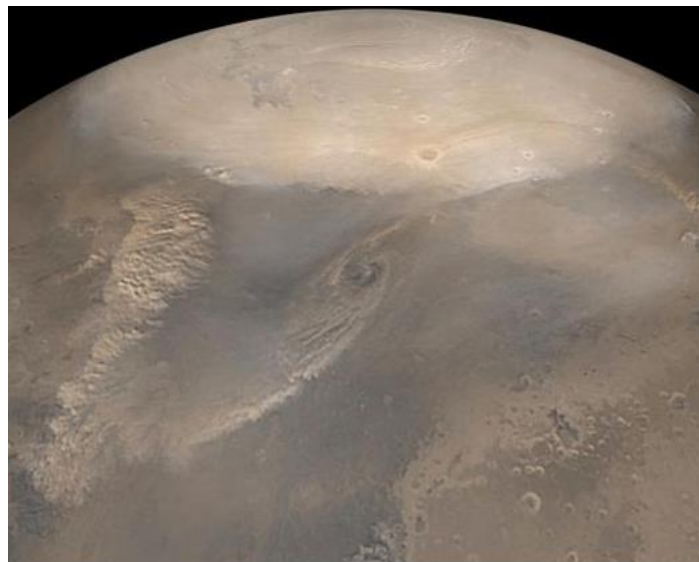


Рис. 1. Утворення пилової бурі у північній півкулі. Взимку замерзлий двоокис вуглецю покриває основну частину північної полярної області (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>)

На їх виникнення впливає декілька чинників. Накладаючись, вони можуть призвести до підняття дуже потужних пилових бур, а інколи – навіть глобальних. Адже атмосферний тиск збільшується при сублімації замерзлого  $\text{CO}_2$  [1, 4]; у такій щільнішій атмосфері [8] пил легше піднімається і довше тримається; саме тоді встановлюється високий температурний контраст між покритою вуглекислотою памороззю і поряд лежачою поверхнею, яка тільки що відтанула. Зазвичай, це приводить до виникнення сильних 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.

Пилові бурі мають відігравати важливу роль на формування марсіанського клімату [9, 15, 17]. Адже саме глобальні шторми змінюють тепловий баланс всієї планети і хід намерзання й випаровування  $\text{CO}_2$  та  $\text{H}_2\text{O}$  у полярних шапках [21]. Також вони впливають на перерозподіл водяної пари [10, 11, 16]. А пилові бурі, що виникають у певному регіоні планети, особливо у її приполярних областях (Рис. 2), суттєво впливають на швидкості сезонних змін у відповідних полярних шапках [13, 14], регулюючи основні параметри регіональної погоди. Тобто, порівняно тонкий шар пилової речовини на поверхні Марсу створює дуже сприятливі умови для виникнення пилових бур тривалістю від кількох годин і до кількох місяців [5, 18]. Для підйому пилового матеріалу в умовах атмосфери Марсу потрібні швидкості вітру у 20-30 м/с. І на поверхні Марсу існують області, у яких такі значення швидкостей вітру спостерігаються.

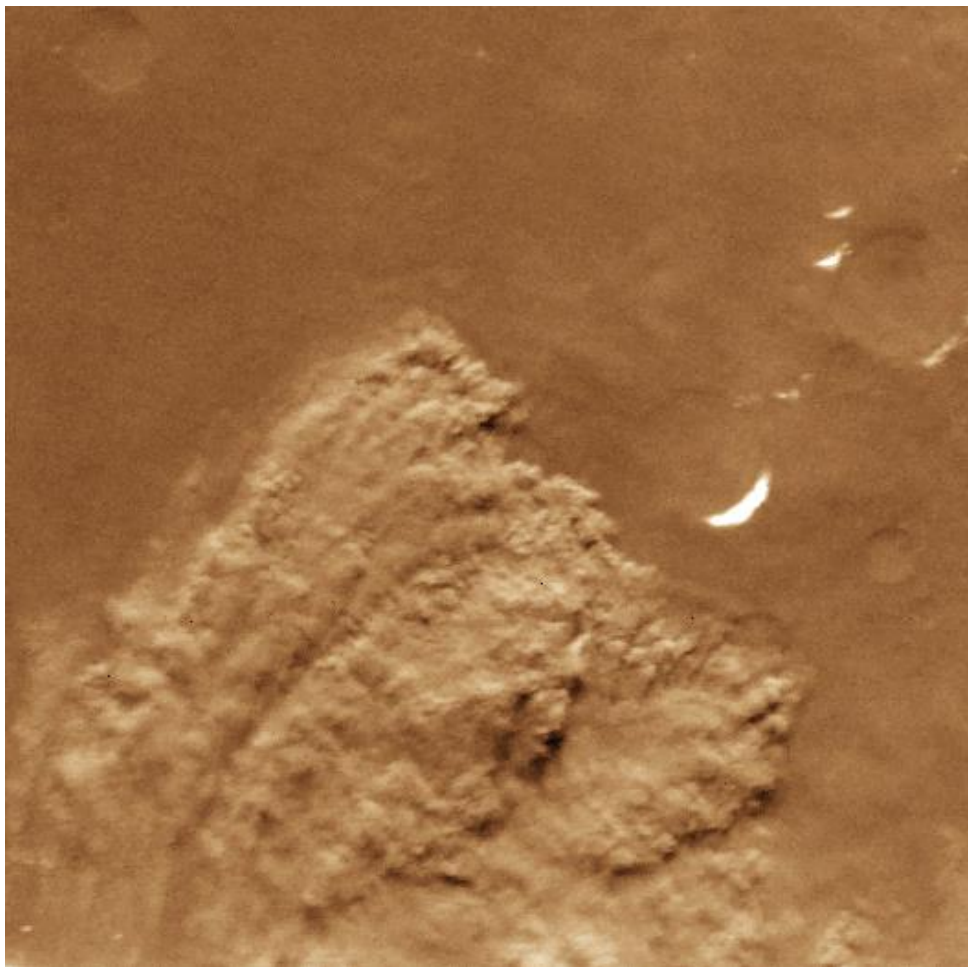


Рис. 2. Локальна пилова буря утворена біля краю південної полярної шапки, де вітри найсильніші (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>)

Особливо потужні смерчі зазвичай утворюються у моменти перебування Марса поблизу перигелію його орбіти. У такий час інтенсивність опромінення поверхні сонячним світлом майже на 25% більша, від моментів так званого середнього протистояння, та практично на 50% більша, ніж при знаходженні планети в афелії. Саме по цій причині глобальні пилові бурі найчастіше утворюються у періоди близькі до великих протистоянь. У такі моменти літо в південній півкулі практично співпадає з часом проходженням Марса поблизу точки перигелію.

Зміни потемніння на різних ділянках поверхні планети, які спостерігається при зміні сезонів, можна пояснити змінами напрямку вітрів, котрі постійно дмуть в напрямку від одного полюса до протилежного полюса. Доволі сильний вітер піднімає в атмосферу верхній шар світлого пилу, при цьому оголюються ділянки дещо темніших порід. В моменти, коли Марс перебуває поблизу перигелію своєї орбіти, порушується глобальна рівновага всього марсіанського середовища. І саме у такий час швидкість вітрів посилюється до значень 20-30 м/с, які викликають закручування атмосферних вихорів (Рис. 3), котрі підіймають пилові бурі. За деяких умов, в атмосферу може піднятися понад мільярд тон пилу та утримувати там у зваженому стані на протязі тривалого часу. Подібні пилові бурі іноді тривають до 100 земних діб. Це приводить до різких змін загального кліматичного стану на всій марсіанській поверхні.



Рис. 3. Утворення циклонних вихорів уздовж краю марсіанської полярної шапки. На передньому плані видно яскраві області замороженої води (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>)

На Марсі в час пилових бур виникає явище «антипарникового» ефекту. Оскільки хмари піднятого в атмосферу пилу не пропускають до поверхні сонячних променів у видимому спектральному діапазоні, проте пропускають випромінювання теплового діапазону, що йде від неї. Тому планетна поверхня суттєво охолоджується, а атмосфера, відповідно, розігрівається. А існуючий хімічний склад марсіанської атмосфери та детальне дослідження «рози» вітрів на планеті за допомогою космічних апаратів – дозволили виявити вплив полярних шапок на формування пилових бур. Адже, при таненні матеріалу у полярних шапках вивільняється величезна маса вуглекислого газу. При цьому навіть збільшується атмосферний тиск над ними. У результаті подібних процесів утворюються достатньо сильні вітри, котрі піднімають із марсіанської поверхні дрібні частинки дуже пухкого ґрунту. Таким чином, утворення пилових смерчів пов'язане із підйомом атмосферних мас унаслідок нагрівання марсіанського ґрунту променями Сонця. Проте такі окремі вихори вперше вдалося зареєструвати тільки на початку двохтисячних років при порівнянні декількох послідовних зображень, отриманих із посадкових модулів.

Поява темних слідів на поверхні Марса (Рис. 4), також пов'язана з тим, що їх залишають невеликі пилові смерчі. Вони зривають верхній світлий шар, і залишають темніші сліди на поверхні. Їх утворення пов'язане із нагріванням поверхні сонячним днем та із підняттям теплішого повітря. При цьому підігріті повітряні маси розпочинають швидко обертатись і переміщуватись, забираючи з собою верхній шар пилу. При потраплянні пилу у такий вихор, його стає видно під виглядом торнадо. На Марсі такі пилові вихори інколи досягають кілометрових висот і появлятися там десятками [2]. Швидкість їхнього обертання часто перевищує 30 м/с і вони за секунди знижують видимість поверхні до нуля.

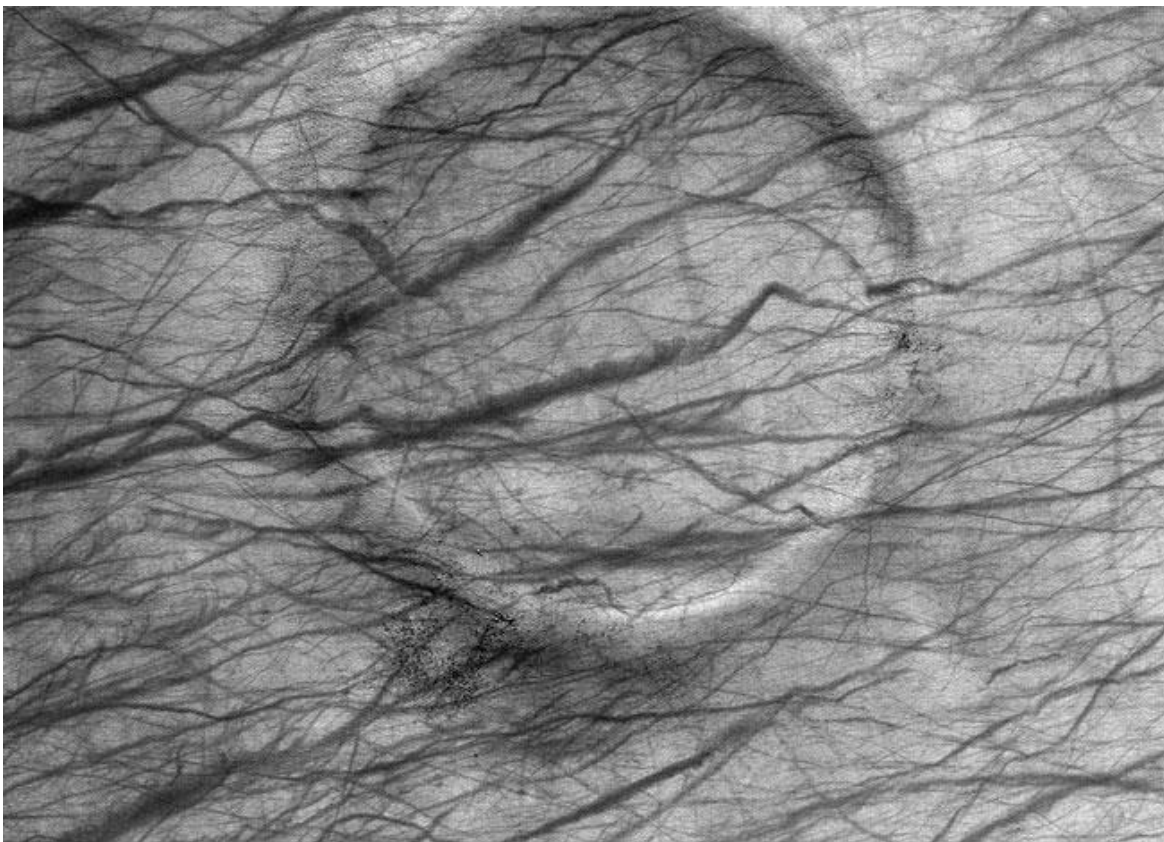


Рис. 4. Темні сліди від вихорів на поверхні Марса (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>)

Але все ж, атмосфера Марса переважно дуже прозора і лише інколи, в періоди глобальних пилових бур, видимість деталей поверхні сильно послаблюється, або й зовсім щезає.

#### **Список використаних джерел:**

1. 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.
2. 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. *J. of Geophys. Research: Planets*. 10(E3), p. 1-18.
3. Goldspiel J.M., Squyres S.W. (2000). Groundwater sapping and valley formation on Mars. *Icarus*, 148, 176-192.
4. Hoffman N. (2000) White Mars: A New Model for Mars' Surface and Atmosphere Based on CO<sub>2</sub>. *Icarus*. 146(2), p. 326-342.
5. 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, in Houston, Texas. LPI Contribution No. 1966, 2017, id.6010.
6. Murray B.C., Ward W.R., Yeung S.C. (1972) Periodic Insolation Variations on Mars. *Science*. 180(4086), p. 638-640.
7. Vid'machenko A.P., Morozhenko A.V. (2005) Mapping of the physical characteristics and mineral composition of a superficial layer of the Moon or Mars and ultra-violet polarimetry from the orbital station. 36th LPSC, March 14-18, League City, Texas, abstract #1015.
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. (2018) Water in Solar system. 20 ISCo AS YS, May 23-24, 2018. Uman, Ukraine, p. 91-93.
11. Vidmachenko A.P. (2009) Water on Mars. *Astronomical almanac*. 56, p. 225-249.
12. Vidmachenko A.P. (2014) Study of Earth-like planets. 16 ISCo AS YS, May 29-31, 2014. Kirovohrad, Ukraine, p. 12-13.
13. Vidmachenko A.P. (2016) Activity of processes on the visible surfaces of Solar System bodies. *Astronomical School's Report* 12 (1), p. 14-26.
14. Vidmachenko A.P. (2016) Activity of processes on the visible surface of planets of Solar system. 18 ISCo AS YS. NAU, Kyiv, Ukraine. May 26-27, 2016, p. 23-27.
15. 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.
16. Vidmachenko A.P. (2018) Water in Solar system. 20 ISCo AS YS, May 23-24, 2018. Uman, Ukraine, p. 91-93.
17. 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.
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 NAS of Ukraine, NULES of Ukraine. Kyiv, Publishing House "Profi". -388 p.
20. 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.
21. 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.

#### **PECULIARITIES OF DUST STORMS ON MARS**

**Anatoliy Vidmachenko** – Doctor of Science, Professor

**Oleksandr Mozghovyi** – PhD, Associate Professor

**Oleksii Steklov** – PhD, Senior Research Fellow

*Spring on Mars is the time of origin of dust storms in the corresponding hemisphere. They occur when frozen carbon dioxide begins to evaporate from the winter polar caps. At the same time, atmospheric pressure increases during the sublimation of frozen CO<sub>2</sub>; between the water frost, covered with solid carbon dioxide and the newly thawed surface, in a denser atmosphere, dust rises more easily and lasts longer. The establishment of a high temperature contrast leads to the emergence of strong winds that blow from the edges of the polar cap towards the middle latitudes. Dust storms play an important role in shaping the Martian climate.*

**Key words:** Mars, atmosphere, changes in the Martian climate, dust storms, anti-greenhouse effect.

## ІСТОРИЯ ВОДИ НА МАРСІ

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

**Олександр Мозговий** – канд. техн. наук, доцент

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

*За даними з орбітальних модулів і марсоходів реконструйовано етапи розвитку подій на Марсі. У Філлоціанову еру, що почалася 4.5 млрд. років тому і тривала ~500-1000 млн. років, Марс був вологою планетою, і тому породи в ту пору зазнавали водної ерозії. Після глобальних змін клімату, викликаних, можливо, вулканічною діяльністю, почалася Теїкіанова епоха. Вона тривала до 3.5 млрд. років тому. Близько 3.3 млрд. років тому розпочалася Сідеріканова ера. Саме у той час розпочалося масштабне утворення оксидів заліза, які могли надати планеті червонуватого кольору. Системи сучасних долин і каналів Марса також свідчать про минулу присутність проточної води на поверхні. Тому припускають, що раннє марсіанське середовище відрізнялося від холодних і сухих умов сьогодення. Таким чином зима на Марсі була майже нескінченна і порушувалася тільки короточасними періодами, коли йшли дощі і мали місце великі повені.*

**Ключові слова:** Марс, глобальні зміни клімату, геологічні ери, вода на планеті.

Виходячи із даних зібраних орбітальними модулями і марсоходами були реконструйовані можливі етапи розвитку подій на Марсі [23]. Перша геологічна ера планети – Філлоціанова – почалася 4.5 млрд. років тому і тривала ~500-1000 млн. років. Тоді Марс був вологою планетою, і тому породи, що належали до неї, зазнавали суттєвої водної ерозії. Тому ці породи містять глинисті мінерали філосилікати, для утворення яких [22] потрібно дуже багато води, температура вище 273 К і низька кислотність.

Також там виявлено багато розкиданих по поверхні планети ділянок з породами, які зазвичай є в молодих вулканічних породах. Після глобальних змін клімату, викликаних, можливо, вулканічною діяльністю, почалася нова Теїкіанова епоха. Вважають, що вона тривала до 3.5(3.3) млрд. років тому. У той час, унаслідок потужних вулканічних викидів в атмосферу поступала значна кількість сірки. Тому докільля змінилося на дуже кисле, а вода вступила в реакцію із сірчаними з'єднаннями і почала утворювати різні сульфати. Це викликало суттєве осушування планети. Свідченнями цього стала присутність у відповідного віку породах сірого гематиту та гіпсу. А отже, близько 3.3-3.5 млрд. років тому розпочалася третя ера – Сідеріканова. Саме у той час розпочалося масштабне утворення оксидів заліза, які й могли надати планеті червонуватого кольору.

Таким чином, менше 4 млрд років тому на Марсі почалася активна вулканічна діяльність. Тоді у полярних областях лежали крижані шапки, на планеті була присутня газова атмосфера з тиском до 0.4 бар, а вода через глибокі русла живила озера й моря. Згідно різних оцінок це могло тривати протягом 500-1500 млн. років. Проте пізніше ситуація почала змінюватись. Адже планета стала охолоджуватись, активність вулканів знизилася і зменшилися викиди газів в атмосферу. Вважається, що атмосфера і вода з поверхні втрапилися після потужного бомбардування метеороїдами великих розмірів. Про