

*Анатолій Відьмаченко. Олександр Мозговий, Олексій Стєклов*

## ТЕМНІ ПЛЯМИ НА ПОВЕРХНІ МАРСА МОЖУТЬ БУТИ ПРОЛОМАМИ ДО КРИЖАНИХ ПЕЧЕР

**Анотація.** На початку 2000-них років на схилах марсіанського вулкану *Arsya* знайдено 7 темних плям. Дослідження показали, що вони є провалами до вулканічних печер. Поруч із вулканічним регіоном *Елізіум* знайшли канали шириною від кількох сотень метрів до кількох кілометрів. У місцях закінчення цих каналів були знайдені ями з розмірами в 1-2 км та глибиною до 0.5 км. У таких ямах під поверхнею може утримуватися водний лід. Дослідження зображень вулкану *Pavonis Mons*, отриманих за допомогою камери «THEMIS» з орбітального апарата «*Mars Odyssey*», дозволили знайти печерні трубки у вигляді ланцюгів обвалів із плоскою основою й похилими боками та кілька темних вертикальних провалів в даху печер. У *Acidalia Planitia* були знайдені льодовикові потоки і яри, які нагадують порізані річками земні аналоги. Вони є відносно неглибокими і розташовані на звернених до екватора пологих схилах підвищень. Їх орієнтація щодо екватора вказує на необхідність врахування контролю інсоляцією. Утворення таких ям можуть бути викликані кріогенними процесами у промерзлих ґрунтах та просіданням поверхневих шарів унаслідок відтаювання льоду.

**Ключові слова:** Марс, темні провали, обвалення ґрунту, крижані печери, відтаювання льоду.

Поверхня Марса вкрита гірськими масивами і рівнинними територіями з вулканічними та ударними кратерами різного віку [11, 12, 15]. На початку 2000-них років на схилах вулкану *Arsya* було знайдено 7 темних округлих плям. Вони отримали жіночі імена Венді, Дена, Джінн, Еббі, Ені, Ніккі й Хлоя. Їх ретельні дослідження показали, що дані плями є глибокими провалами в стелі до великих вулканічних печер. Вони могли бути утворені унаслідок провалу матеріалу поверхні у підземні порожнини. Оскільки їх спостерігають у вигляді ланцюжків та розломів, то вони можуть бути викликані ще й розтягуванням поверхні. Причиною таких розтягувань і розтріскувань могли бути вулканічні та тектонічні процеси [21]. У ці порожнини з часом могли провалюватися породи з поверхні планети, залишивши там западини [17, 20]. Одним з найстаріших вулканів на Марсі є *Tyrrenus Mons*. Тому на його схилах утворилося багато радіально розташованих ярів (рис. 1, ліворуч). На відміну від більшості інших марсіанських вулканів [16], його схили складаються не з базальтового матеріалу, а переважно з шарів вулканічного попелу. Така особливість приводила до того, що схили цього вулкана

легко розмивалися, утворюючи широкі канали від декількох кратерів на його вершині.

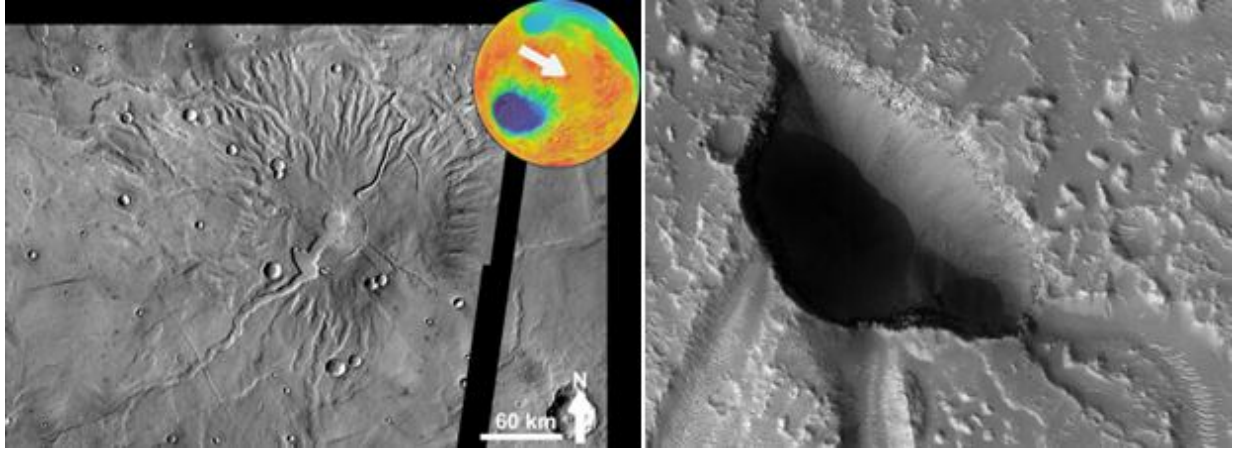


Рис. 1. Ліворуч – зображення вулкана Tyrrhenus Mons отримане з орбітального апарата «Mars Odyssey» 24.2.2022

([https://photojournal.jpl.nasa.gov/figures/PIA25159\\_fig1.png](https://photojournal.jpl.nasa.gov/figures/PIA25159_fig1.png)).

Праворуч – яма з розмірами 1875×1125 м (NASA/JPL-Caltech/UArizona)

Льодовикові печери утворюються в тілі льодовиків ще й під впливом талої води. Вони утворюють проходи, висотою до кількох метрів, довжиною у кілька сотень метрів та глибиною до сотні метрів і більше. Вважають, що мільярди років тому на поверхні Марса розміщувалися величезні океани, моря, довгі річкові системи та озера. Тоді Марс був схожим на нашу Землю [2]. Проте з тих пір Марс був позбавлений атмосфери [13] та рідкої води [8]. Можливо, навіть, що на Марсі могли встигнути розвинутися певні форми життя [4, 5, 9, 10]. Проте досі не знайдено жодного доказу щодо цього. Орбітальний апарат «Mars Reconnaissance Orbiter» продовжує досліджувати поверхню планети [6], 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. 1, праворуч). За тінню, яку відкидає стіна на дно ями, глибину ями оцінили в 500 м. Дно ями вкрите шаром валунів й

відкладеннями. Схили котловану також усіяні валунами діаметром до декількох метрів. Такі ями можуть утримувати під своєю поверхнею водний лід [1], який могли б використовувати майбутні довгострокові поселення [18]. Проте окрім забезпечення водою, ями також можуть бути використані як природний притулок для поселень. Тому вони є потенційними місцями висадки для майбутніх досліджень людиною.

Дослідження кількох сотень зображень ділянки Марса на вулкані Pavonis Mons, отриманих з хорошою роздільною здатністю камерою «THEMIS» з космічного апарата «Mars Odyssey», дозволили знайти там чимало лавових трубок. Вони видні у вигляді ланцюгів обвалів із плоскою основою та похилими боками. Але там знайдено і кілька темних вертикальних провалів (рис. 2). Ці отвори були аномальними порівняно зі звичайними кратерами ланцюгової ями. Вони нагадували відносно прямий отвір, що спускався під поверхню. Вони є своєрідними «вікнами», коли невелика частина даху печери обвалилася. Вони виявилися холоднішими за поверхню вдень, і теплішими за неї – вночі. Саме цього слід було очікувати. Адже температура на поверхні Марса показує значний добовий діапазон змін, тоді як температура під поверхнею залишається майже незмінною. Розміри отвору виявилися  $190 \times 160$  м і він був 115 м глибиною.

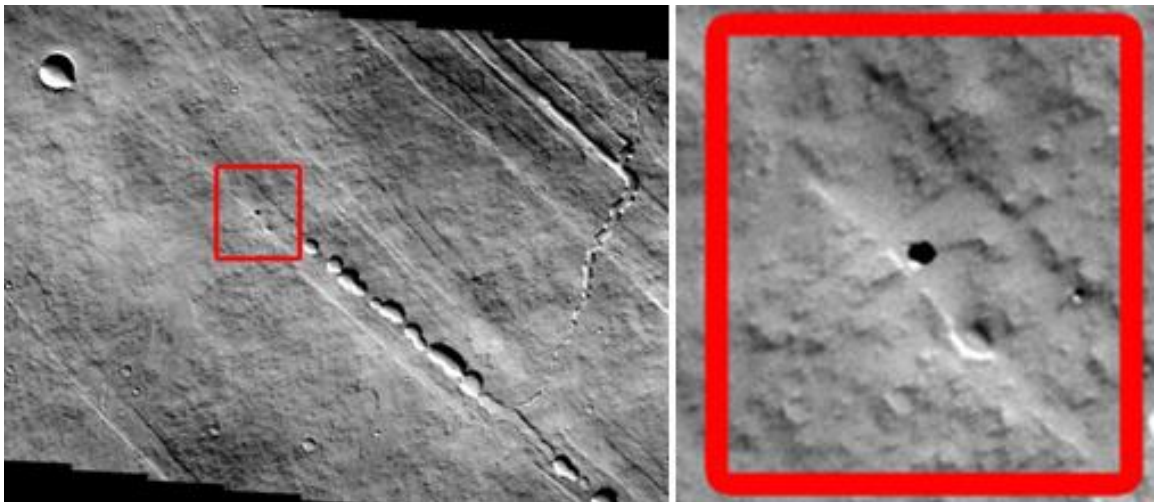


Рис. 2. Можливий отвір у даху марсіанської лавової трубки

([https://www.redshift-live.com/binaries/asset/image/28604/image/Martian\\_Hole.jpg](https://www.redshift-live.com/binaries/asset/image/28604/image/Martian_Hole.jpg))

Марс є найбільш схожою на Землю планетою в Сонячній системі. Він має 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 їх вивчають протягом останніх кількох десятиліть. Одну з таких особливостей називають ями (рис. 3) [3]. Ці ями у формі ланцюгів схожі на провалену поверхню. Кожна з них має округлу, подовжену, чи неправильну форму з піднятими краями; вони досягають кількох сотень метрів у діаметрі. Переважно їх знаходять на обернених до екватора пологих схилах підвищень, на внутрішніх стінах кратерів тощо. Зазвичай вони утворюють ланцюжки, проте існують і окремо [23]. Відсутність накладання гребенів цих ям свідчить про те, що більшість із них утворилися майже одночасно (рис. 4, праворуч). 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. Такого типу ями зустрічаються переважно у південній частині Acidalia Planitia, на захід і північний захід від Cydonia Mensae (рис. 4, ліворуч).

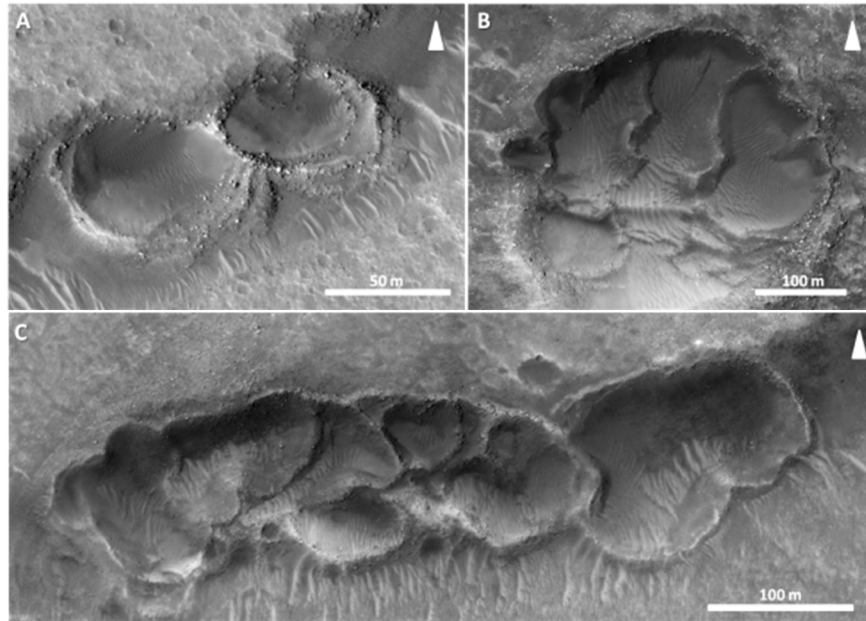


Рис. 3. Різні морфологічні варіанти ям, розташованих в Acidalia Planitia.

А) Майже круглі ями з багатьма валунами по краях (HiRISE ID: ESP\_019783\_2115\_RED). В) Кілька подовжених ям без явного перекриття крайових відкладень (HiRISE ID: ESP\_026521\_2130\_RED). С) Скупчення кількох ям на схилі топографічного об'єкта, направленого до екватора (HiRISE ID: ESP\_026521\_2130\_RED)

До появи зображень, отриманих «HiRISE», вважали, що ями утворювалися подібно до земних еолових викидів [2]. Проте неправильна форма багатьох із знайдених ям суперечить утворенню вторинних кратерів чи вулканічних особливостей. Проте їх орієнтація відносно екватора вказує на необхідність враховувати їхній контроль інсоляцією. Крім того, дещо підняті бокові стіни усіх ям можуть свідчити про їх високоенергетичне «розкопування» якимось невідомим агентом. Однією із можливостей є дія газових струменів, створених, наприклад, шляхом сублімації  $\text{CO}_2$  під покладами сухого льоду. Хоча потужні плити сухого льоду навряд чи зможуть бути присутніми на низьких широтах, де і спостерігаються ці ями. Інша можливість утворення ям полягає в тому, що вони є 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 [22]. Також можна

вважати, що утворення ям можуть бути викликані кріогенними процесами у промерзлих ґрунтах [14]. 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 Alba Patera у південній півкулі. Виходячи з карти місткості льоду, яка отримана 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 не можна пояснити лише розмерзанням льоду під поверхнею.

Максимальна вулканічна діяльність на Марсі відбувалася близько 3,6 мільярдів років тому. А майже закінчилася вона, ймовірно, приблизно 1,8 мільярдів років тому. Ланцюги западин на Arsia Mons добре вписуються в ці вулканічні процеси. А ряд ланцюгових западин у центральній частині Chryse Planitia (рис. 2) викликані, скоріше всього, обвалами і просіданнями поверхневих шарів. Такий механізм може бути відповідальним за утворення деяких обвалених каньйонів, або ж витягнутих форм просідання суші у результаті танення льоду під верхнім шаром поверхні.

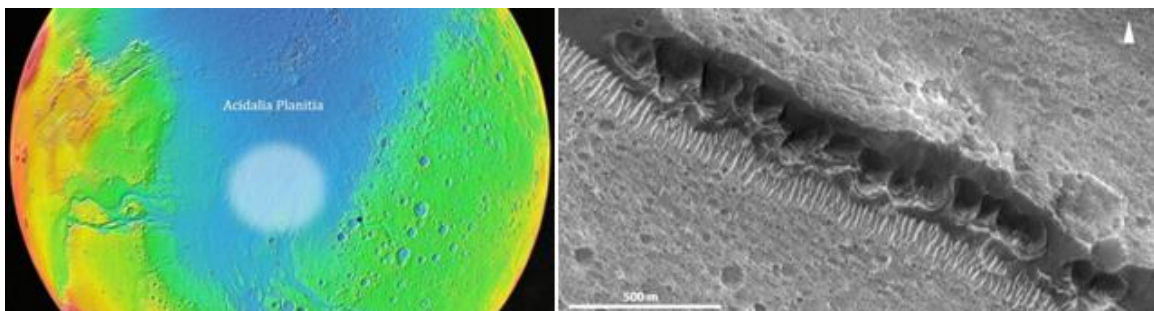


Рис. 4. Ліворуч – карта великих північних рівнин Ацидалія Планітія.

Світлим колом показано розташування більшості задокументованих ям.

Праворуч – ланцюг ям, розташованих на зверненому до екватора схилі хребта.

Ями виглядають молодими через добре збережені ободи. Деякі ями демонструють обмежені еолові відкладення (NASA/JPL/UofA for HiRISE ID:

PSP\_PSP\_008641\_2105\_RED)

Такі форми, найімовірніше, можуть бути пов'язані із системами танення льоду [1], які викликані 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 обвалюватися, наприклад, через сезонне [7] 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 западину; іноді вона буде злегка звивистою та з пологими схилами.

#### Список використаних джерел:

1. 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.
2. 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 conf. 13-15 June, Houston, Texas. LPI Contribution No. 1966, 2017, id. 6010. 30.
3. Orgel, C., Hauber E., van Gasselt 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.
4. 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. 17
5. 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 Annual Lunar and Planetary Science Conference, March 14-18, 2005, in League City, Texas #1015. 32
6. Vid'machenko A.P. (2009) Research of the Mars by space vehicles. 11 International scientific conference Astronomical School of Young Scientists, May 26-29, 2009, Kherson, Ukraine, p. 11-12.
7. 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.
8. Vidmachenko A.P. (2009) Water on Mars. *Astron. almanac*. 56, p. 225-249.
9. 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.
10. 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. 29
11. Vidmachenko A.P. (2018) Comparative features of volcanoes on Solar system bodies. 20 International scientific conference Astronomical School of Young Scientists. Uman, Ukraine, p. 9-12.
12. 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.

13. 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.
14. Vidmachenko A.P. (2023) Thermal properties of the surface of Mars. Proceedings of VII ISPCo. Progressive research in the modern world (March 29-31, 2023). Chapter 42. BoScience Publisher, Boston, USA, p. 243-252.
15. 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.
16. Vidmachenko A.P., Mozghovyi O.V., Steklov O.F. (2023) About volcanoes on Mars. Proceedings of 11 All-Ukrainian SCo "Astronomy and present day", April 12, 2023. Vinnytsia, Ukraine. LLC "TVORY", p. 76-81.
17. Vidmachenko A.P., Mozghovyi O.V., Steklov O.F. (2023) Features of the relief on the surface of Mars. Proceedings of 11 All-Ukrainian SCo "Astronomy and present day", April 12, 2023. Vinnytsia, Ukraine. LLC "TVORY", p. 66-71.
18. 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.
19. Vidmachenko A.P., Mozgovyi A., Steklov O. (2021) Specificity of long-term human settlements on Mars. Astronomy and the present. 10th All-Ukrainian scientific conference, April 12, 2021, Vinnytsia. p. 60-61.
20. 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.
21. Vidmachenko A.P., Steklov A.F. (2022) Features of volcanic structures on Venus. Proceedings of the 9th ISPCo. Modern directions of scientific research development. BoScience Publisher. Chicago, USA. 23-25.02.2022. P. 195-204.
22. 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 ISPCo. Barca Academy Publishing, Madrid, Spain. 16-18.01.2022. P. 226-232.
23. Zalewska N. (2017) Ice or Volcano - Interpretation of Pitted Martian Terrain. 48th Lunar and Planetary Science Conference. #2225.

## DARK SPOTS ON THE SURFACE OF MARS MAY BE BREACHES TO ICE CAVES

**Abstract.** *In the early 2000s, 7 dark spots were found on the slopes of the Martian volcano Arsia. Studies have shown that they are sinkholes to volcanic caves. Near the volcanic region of Elysium, channels with a width of several hundred meters to several kilometers were found. At the ends of these channels, pits with dimensions of 1-2 km and a depth of up to 0.5 km were found. Such pits can hold water ice below the surface. Studies of images of the Pavonis Mons volcano obtained by the "THEMIS" camera from the "Mars Odyssey" orbiter revealed cave tubes in the form of chains of collapses with flat bases and sloping sides, and several dark vertical depressions in the roof of the caves. In Acidalia Planitia, glacial streams and ravines have been found that resemble their terrestrial counterparts cut by rivers. They are relatively shallow and are located on gentle slopes of elevations facing the equator. Their orientation relative to the equator indicates the need to take into account the control of insolation. Formation of such pits can be caused by cryogenic processes in frozen soils and subsidence of surface layers as a result of thawing of ice.*

**Keywords:** Mars, dark sinkholes, landslides, ice caves, melting ice.