

ОСОБЛИВОСТІ РЕЛЬЄФУ НА ПОВЕРХНІ МАРСА

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

Олександр Мозговий – канд. техн. наук, доцент

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

Радіолокаційні спостереження поверхні Марса та лазерна дальнометрія з високою роздільною здатністю по висоті та по трасі – дозволили побудувати топографічну карту Марса з максимальним перепадом висот між вершинами і долинами близько 32 км. Розвиток Марса відбувається в режимі плюмової тектоніки. У північній півкулі планети переважно розташовані порівняно гладкі рівнини. У південній півкулі – в основному поширені вкриті багатьма кратерами припідняті на кілька кілометрів. На Марсі знайдено 5 великих і понад 70 невеликих погаслих вулканів.

Ключові слова: Марс, рельєф, радіолокація, лазерна дальнометрія, плюмова тектоніка.

Радіолокаційні (РЛ) спостереження поверхні Марса були започатковані в протистояння 1963 р. на довжині хвилі 12.5 см [2]. Вони продовжувались у наступні 5 протистоянь. Особливо активними ці дослідження були в протистояння 1971-1975 рр., коли вибирались місця посадки модулів космічних апаратів (КА) «Вікінг-1, -2» [1, 5]. Спостереження з КА «Марінер-6, -7», які пролетіли мимо Марса, започаткували експерименти з бістатичної радіолокації. Це дозволило досліджувати характеристики навіть невеликих за розмірами деталей. Значно більший обсяг спостережних даних було отримано з орбітальних модулів КА «Вікінг-1, -2». Так, виявилось, що значення кута нахилу зменшуються в напрямку з півдня на північ до 4.5° . Особливо це помітно для широт більших 60° . З орбітальних модулів деяких КА проводилась ще й лазерна дальнометрія. Наприклад, з борту КА «Марс Глобал Сервеєр» була проведена детальна дальнометрія з роздільною здатністю по висоті до 0.3 м, та по трасі у 300-400 м.

Геологічні процеси на Марсі – дуже різноманітні. А сама поверхня значно відрізняється по окремих регіонах. Для поверхні планети характерна глобальна асиметрія в розподілі рівнин, які складають до 35% усієї поверхні, і піднесених областей, покритих безліччю різного типу кратерів [4]. Переважна частина рівнин розташована в північній півкулі. Межа між ними в ряді випадків представлена типом рельєфу, названим столовими горами. Це є гори з плоскими вершинами. Древні високогір'я покривають південну півкулю. Вони відрізняються від молодших північних рівнин. На поверхні планети виділяється область Фарсіда, яка в середньому припіднята на 4 км і займає до 15% площі планети. Саме тут розташовані гігантські щитові вулкани. Один з яких – Олімп – є найвищим у Сонячній системі. Тобто, поверхня Марса характеризується так званою дихотомією, коли південна півкуля, древніша і вкрита кратерами, є більш припіднятою. А північна на значних площах вкрита рівнинами і трохи опущена [10].

Значний прогрес у вивченні марсіанської топографії й поверхні планети було досягнуто за допомогою лазерного висотоміра й панорамної камери високої просторової роздільної здатності, установлених на борту КА «Марс Глобал Сервейєр». Середня точність їх вимірювань становила 13 м, а на рівних поверхнях – до 2 м. Вдалося виявити, що пошарова будова верхньої кори є загальною властивістю планети. Так, у Долинах Марінера вона простежується до глибини 10 км. Ця величезна рифтова долина на сході від області Фарсіда, простягається більше, ніж на 4000 км в екваторіальній області Марса при максимальній ширині до 700 км і глибині місцями до 7 км (Рис. 1). Вона розташовується на довготах від 20° до 100°W , а у широтному поясі – між екватором і 15°S . Каньйони Марса значно ширші й глибші, ніж їх земні аналоги.

З допомогою лазерного висотоміра було виконано кілька мільйонів вимірювань. У результаті такої роботи була отримана топографічна карта Марса (Рис. 2). Гори на ній –

жовті й коричневі, а западини – зелені й сині. Максимальний перепад висот між вершинами і долинами на Марсі становить близько 32 км.

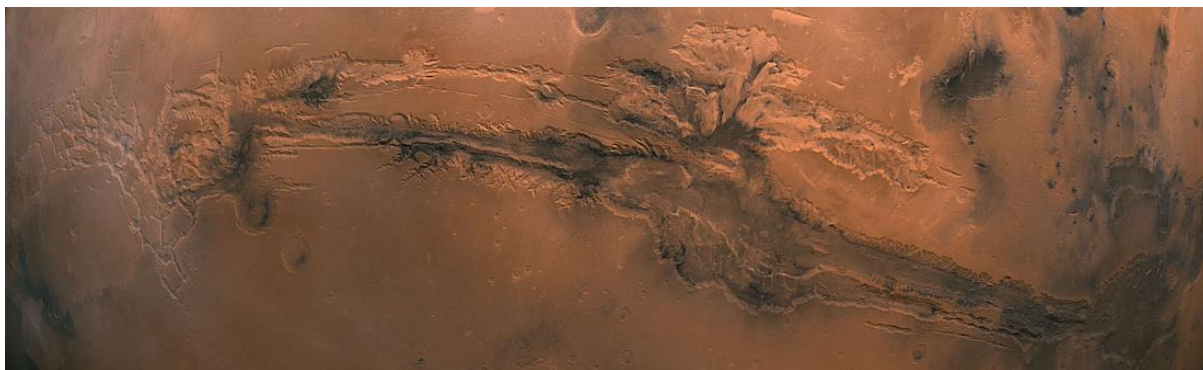


Рис. 1. Долини Марінера (<https://mymodernmet.com/valles-marineris-photo-nasa/>)

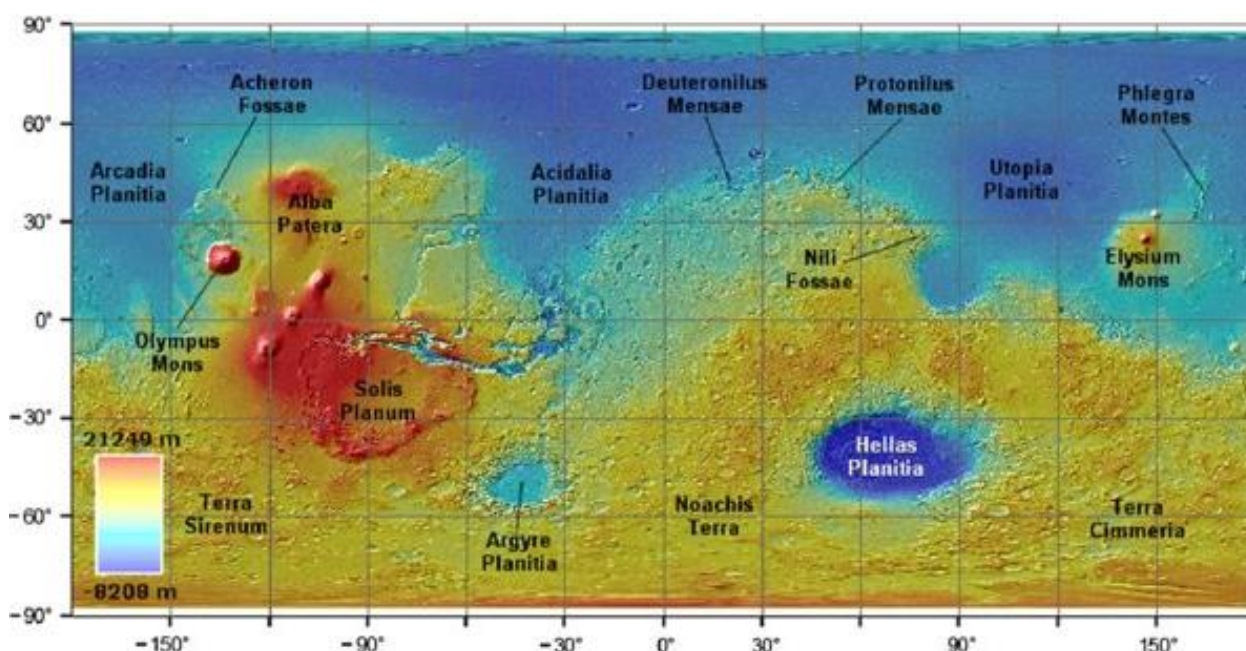


Рис. 2. Карта рельєфу Марса (<https://www.researchgate.net/profile/Bryn-Hubbard/publication/251730490/figure/fig4.jpg>)

Поверхня відліку висот на Марсі до запуску «Марс Глобал Сервейер» визначалася гравітаційним полем у поєднанні з поверхнею, на якій середній атмосферний тиск складав 6.1 мбар [3, 9]. Для визначення висот використовувалися наземні радіолокаційні дані і дані з КА «Марінер-9», «Вікінг-1 і -2». Помилки значень висот склали від 1 до 3 км. Нові висотні відмітки відлічуються від еквіпотенціальної поверхні тривісного еліпсоїда обертання з наступними параметрами: довжина осей еліпсоїда $A=3398.627$ км (1.0°N , 72.4°E); $B=3393.760$ км (0°N , 342.4°E); $C=3376.200$ м (широта 89.0°N , 252.4°E). Нова карта Марса була виконана методом пошарового забарвлення з 21 ступенем висот між горизонталями. До висоти 8 км перетин рельєфу йшов через 1 км; від 8 до 12 км – через 2 км; вище 12 км кольором показаний один ступінь з висотними відмітками вершин.

Вважається, що походження каньйонів пов'язане з рухом плит марсіанської кори декілька мільярдів років тому [6]. Так, центральна частина системи каньйонів є величезним рифтом, сформованим у результаті розколу марсіанської кори. У західній частині цей рифт переходить у широку зону каньйонів, які назвали Лабіринти Ночі. У східній частині долини Марінера розташована обширна область хаотичних місцевостей. І вже від неї беруть початок декілька найбільших долин; вони йдуть далі на північ і

впадають там у басейн Хрїса. Також вдалося зробити висновок, що на відміну від Землі, яка еволюціонує в режимі добре відомої тектоніки плит, розвиток Марса відбувається в режимі так званої плюмової тектоніки. Один з гігантських мантийних плюмів утворив підняту область Фарсіда, а інший, менш потужний, область Елізіум.

Зображення Марса, отримані зондом «Марс Глобал Сервейор», дозволили розрізнити деталі на поверхні Марса розміром у десятки метрів. Розгляд карти Марса показує, що рельєф північної і південної півкуль помітно розрізняються. Велику частину північної півкулі займають порівняно гладкі рівнини: Велика Північна Рівнина, що тягнеться від північної полярної області, переходить у західній півкулі в рівнини Аркадія, Амазонія, Хрїса і Ацидалійську, а в східному – в рівнини Утопія, Елізій та Ісіда. Ці рівнини лежать нижче середнього рівня поверхні планети. Наприклад, Велика Північна, Утопії і Ацидалійська Рівнини мають глибини в 4-5 км. Рівнини Аркадія, Амазонія й Хрїса розташовані вище на 1 км. У процесі формування північних рівнин важливу роль відігравав, мабуть, підповерхневий лід [11, 17].

У південній півкулі в основному поширені вкриті багатьма кратерами припіднятості на кілька кілометрів. Рівнин там порівняно мало і вони не такі обширні, як у північній півкулі. Це рівнини Еллада [12, 14, 15] і Аргір. Вони мають округлу форму. Тому вважають, що вони утворилися при падінні на Марс крупних тіл [13, 18]. Плато Сирія розташоване на висотах 5-6 км, Плато Сїнай – 3-5 км, Плато Сонця – 3-4 км і т.д. А поблизу екватора знаходиться піднесеність Фарсіда, висотою до 8 км. Над нею підносяться розташовані на одній лінії три згаснувші вулкани: Аскрійський, Павлін і Арсія [16]. На північно-західній околиці Фарсіди розташований найвищий вулкан в Сонячній системі – Олімп. Фарсіду оточує обширна система розломів. Крутизна схилів деяких каньйонів тут досягає 20 градусів. Часто зустрічаються долини, схожі на висохлі русла, які можуть свідчити про те, що в минулому на поверхні Марса існували водні потоки. Більшість таких протяжних долин розташовані в приекваторіальній зоні і лише окремі з них зустрічаються в середніх широтах.

Розподіл висот поверхні в Західній і Східній півкулях Марса показує, що Західна півкуля у середньому дещо вища, ніж Східна. Площа, зайнята рівнинами, практично однакова в цих півкулях. У східній півкулі є вулканічна область, названа Плато Елізій. На ньому розташовано три вулкани, найбільший з них – Елізій – має поперечник у 150 км і висоту до 14 км. Окремі невеликі вулкани можна бачити і в інших областях Марса. У перехідній зоні від піднесеної області до рівнин у північній півкулі знаходяться плосковершинні так звані Столові гори Цидонія, Нілосїрт, Протонїл, Дейтеронїл. Вони розташовані на великому крузі під кутом 35° до екватора. Цей круг відокремлює рівнинну півкулю планети від піднесеної материкової півкулі. Район гір Цидонія характеризується скупченням хаотичних форм, пов'язаних з глобальним уступом шириною більше 100 км. Відмітимо, що саме в ньому були відмічені цікаві форми рельєфу, що отримали назви «піраміди» і «сфінкс». На Рис. 3 проступають 19 пірамід і інших «будівель», з'являються лінії-«дороги» і посередині – дивний круглий майданчик діаметром в кілометр.

«Дороги» проходять не випадковим чином: дві з них підходять до пірамід, відразу три сходяться до круга в центрі. Та й розміри вражають уяву: найбільша центральна піраміда майже вдсятеро перевершує знамениту піраміду Хеопса в Єгипті. Серед численних скельних порід в Цидонійському районі опинився моноліт кілометрової ширини, який зовні нагадував обличчя з ясно помітними людськими рисами і поглядом, оберненим в космос. Побачити це зображення із Землі було неможливо навіть за допомогою телескопів. Лише знаходячись на орбіті Марса, виявилось можливим розгледіти цей феномен.

Побудовані карти показали ще ряд цікавих особливостей форм рельєфу Марса. Так виявилось, що відомі плато Сирія, Сїнай, Дедалія і Сонця – насправді не є рівними плато, а знаходяться на глобальному схилі. Найвищі області – це вулканічні куполи гір на плато

Фарсида й рівнині Елізій. Хоча ці вулкани вже не є діючими, вони, ймовірно, були активними набагато довше, ніж будь-які вулкани на Землі. При цьому гарячі вулканічні точки на Землі з часом змінювали своє місце розташування через поступовий рух континентальних плит. Крім того, менша сила тяжіння дозволяла виверженій речовині утворювати на Марсі набагато вищі структури, які не обрушувалися під власною вагою. Найбільший з погаслих вулканів – Олімп, має підшову діаметром у 700-900 км і кальдеру на вершині поперечником близько 60-90 км.

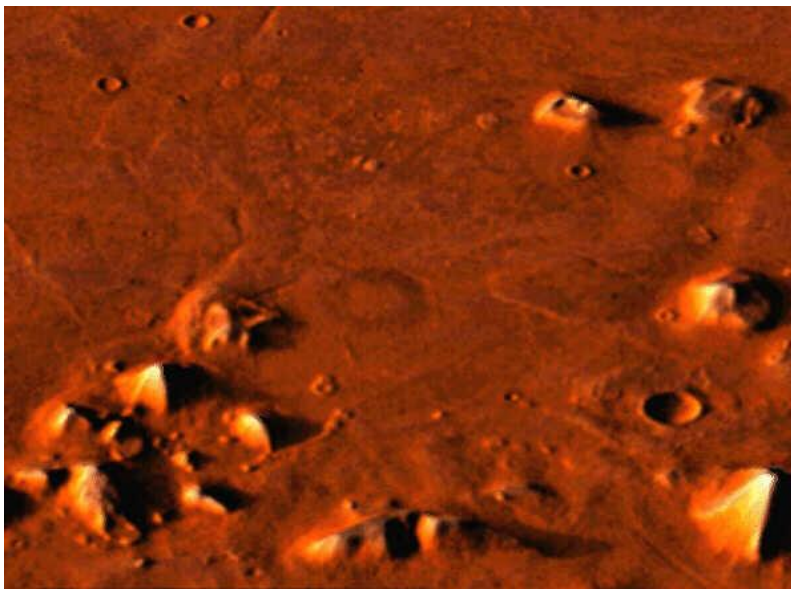


Рис. 3. Скельні породи в Цидонійському районі Марса (піраміди, дороги, сфінкс). (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>)

Інший район древніх вулканів – Рівнина Елізіум – піднімається над навколишнім пейзажем на 5 км. Це величезна вулканічна рівнина з поперечником більше 5000 км. Крім того, на Марсі знайдені ще більше 70 погаслих вулканів. Але всі вони набагато менші і за площею, і за висотою. Серед обширних областей на Марсі вирізняються Плато Сонця, що представляє собою древню вулканічну рівнину з різним мінералогічним складом [8, 19], яка лежить на південь від долин Марінера. При візуальному спостереженні всередині цієї області видно темну пляму змінної форми, яку ще називають «озеро», завдяки чому і вся структура одержала популярну назву «Марсіанське око».

Рівнина Амазонія – представляє собою слабо зафарбовану рівнину в північній екваторіальній області Марса. Вона є досить молода, з віком порід по 10-100 млн. років. Частина цих порід представляє собою застиглу вулканічну лаву. Вулканів у вигляді гір з кратерами в центрі – тут немає, а отже лава прямо вилівалася з тріщин марсіанської кори. Особливо цікавим є те, що тут були знайдені сліди великих розливів лави, які відбувалися тут неодноразово. На підставі досліджень цих багатошарових структур, що утворилися в результаті повторних вивержень, можна зробити висновок про те, що, цілком можливо, вулканічні процеси мають місце на Марсі й зараз.

Отримані дані також показали, що Земля Аравія залягає кілометром нижче навколишніх плоскогір'їв. Це може свідчити про те, що регіон у минулому піддавався ерозії. Ерозія могла бути викликана вулканічною діяльністю, льодовиками, вітром. Однак величезні розміри області, що піддалися впливу ерозії, можуть свідчити про те, що ерозія на Землі Аравія, скоріше всього, була викликана проточною водою.

Ще одна обширна кругла ударна западина – Рівнина Аргірі – має 900 км у діаметрі і розташована в південній півкулі Марса. Рівнина Аркадія – розташована в північній півкулі Марса. Там же знаходиться й велика рівнина Утопія з невеликою кількістю

кратерів. Саме вона була місцем посадки КА «Вікінг-2». Панорамні зображення, передані на Землю із спускового апарату «Вікінг», показали поверхню засіяну безліччю валунів, складених з текстурованих порід. Інша Рівнина Хріса – представляє собою кругле плато, скоріше всього – ударний басейн, розташований у північній екваторіальній області Марса, яке було місцем посадки зонда «Вікінг-1».

Список використаних джерел:

1. Downs G.S., Green R.R., Reichley P.E. (1978) Radar studies of the Martian surface at centimeter wavelengths: The 1975 opposition. *Icarus*, 33(3), p. 441-453.
2. Goldstein R.M., Gilmore W.F. (1963) Radar Observations of Mars. *Science*. 141(3586), p. 1171-1172.
3. Kahn R. (1985) The evolution of CO₂ on Mars. *Icarus*. 62(2), p. 175-190.
4. Mouginis-Mark P. (1979) Martian fluidized crater morphology: Variations with crater size, latitude, altitude, and target material. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 84(B14), p.8011-8022.
5. Pettengill G.H., Shapiro I.I., Rogers A.E.E. (1973) Topography and radar scattering properties of Mars. *Icarus*, 18(1), p. 22-28.
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. Steklov A.F., Vidmachenko A.P. (2019) In what places and what exactly can be the “traces” of life on Mars? 9th International Conference on Mars, Pasadena, California, Jul 22-25, 2019, LPI Contrib. No. 2089, 6007.
8. 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.
9. Vidmachenko A.P. (2009) Planetary atmospheres. *Astronomical School's Report*. 6(1), p. 56-68.
10. Vidmachenko A.P. (2009) Research of the Mars by space vehicles. 11 ISCo AS YS, May 26-29, 2009, Kherson, Ukraine. P. 11-12.
11. Vidmachenko A.P. (2016) Activity of processes on the visible surfaces of Solar System bodies. *Astronomical School's Report* 12 (1), p. 14-26.
12. 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. Mozhovyi. - Vinnytsia: FOP “NP Kostyuk”. - 241 p. P. 43-48.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. Vidmachenko A.P. (2018) Comparative features of volcanoes on Solar system bodies. 20 ISCo AS YS, May 23–24 2018, Uman, Ukraine, p. 9-12.
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 O.V. (2019) Physical parameters of terrestrial planets and their satellites. Kyiv, Editorial and Publishing Department of NULES of Ukraine. -468 p.
19. Vidmachenko A.P., Steklov A.F. (2020) Mineral resources can be mined on different bodies of the Solar System. 22 ISCoAS YS, December 11-12, 2020. Kyiv, Ukraine, p. 89-92.

FEATURES OF THE RELIEF ON THE SURFACE OF MARS.

Anatoliy Vidmachenko – Doctor of Science, Professor

Oleksandr Mozghovyi – PhD, Associate Professor

Oleksii Steklov – PhD, Senior Research Fellow

Radar observations of the surface of Mars and laser's distance measurement with a high resolution in height and along the route - made it possible to build a topographic map of Mars with a maximum height difference between peaks and valleys of about 32 km. The development of the surface of Mars takes place in the regime of plume tectonics. In the northern hemisphere of the planet, relatively smooth plains are mostly located. In the southern hemisphere, elevations of several kilometers are mostly common, covered with many craters. 5 large and more than 70 small extinct volcanoes have been found on Mars.

Key words: Mars, relief, radar, laser ranging, plume tectonics.

ДУЖЕ «СВІЖІ» КРАТЕРИ НА ПОВЕРХНІ МАРСА

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

Олександр Мозговий – канд. техн. наук, доцент

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

Для пояснення появи льоду на низьких широтах, вологість марсіанської атмосфери на момент утворення там криги мала бути значно вищою, ніж зараз. Через розріджену атмосферу Марса метеороїди часто долітають до її поверхні та утворюють там сотні глибоких кратерів щорічно. Їх пошук проводять порівнюючи знімки поверхні з орбіти, отримані в різний час. У викидах зі свіжих кратерів інфрачервоними спектрами підтверджено присутність дуже чистого водяного льоду. Розподіл плям усередині і навколо кратерів показує, що верхня межа крижаного шару у місцях падіння метеорних тіл лежить на глибині 10-35 см. Отримані зображення кратерів вперше дали докази наявності криги на поверхні Марса на всіх широтах, і на екваторі також.

Ключові слова: Марс, розріджена атмосфера, ударні кратери, вода на планеті, підповерхневий лід.

Автори роботи [1] вважають, що лід під поверхнею Марса міг утворитися так само, як і чисті крижані кришталіки під поверхнею Землі при сильному промерзанні ґрунту. За підрахунками, для пояснення появи льоду на середніх і екваторіальних широтах, вологість марсіанської атмосфери на момент утворення там крижаного шару [2, 8, 21] мала бути у півтора рази вищою, ніж зараз [4]. І тут не йдеться про якесь дуже далеке «вологе минуле» Марса мільярди років тому. При цьому, лід має бути не лише на полюсах, але й поблизу екватора.

Оскільки атмосфера Марса дуже розріджена [11], то вона практично не захищає планету від ударів метеоритів і астероїдів. А тому вони набагато частіше долітають до її поверхні та утворюють на Марсі свіжі кратери на метри в глибину і на десятки в ширину [1]. Спеціальний пошук свіжих кратерів почав проводитися на зображеннях марсіанської поверхні, отриманих за допомогою космічного апарату (КА) «Mars Reconnaissance Orbiter» (MRO) [12]. Порівнюючи знімки, отримані в різний час камерою з високою роздільною здатністю HiRISE, дослідники шукали свіжі тільки що утворені плями. Саме так повинні б виглядати викиди [15, 17, 18] зі свіжих кратерів. Адже основна частина марсіанського ґрунту темніша за світлий пил [5-7] і пісок, які вітер постійно переносить по поверхні планети [10, 14].

На отриманих за допомогою камери HiRISE фото околиць рівнин Аркадія й Утопія в північній півкулі Марса, лише протягом року вдалося зареєструвати понад 90 свіжих кратерів розмірами від 1 – до півтора десятка метрів та глибиною від майже половини – до 2.5 м. Вони розташовані в п'яти різних регіонах Марса, у яких підтверджено присутність там дуже чистого і яскравого водяного льоду [3]. Через кілька місяців цей лід, як і лід з викопаної «Феніксом» траншеї, частково випарувався. Розподіл плям усередині і навколо кратерів показує, що верхня межа крижаного шару у місцях падіння метеорних тіл лежить на глибині 10-35 см. А його товщина складає від декількох сантиметрів до кількох метрів.