

20. 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. Main Astronomical Observatory NAS of Ukraine, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Kyiv, Publishing House "Profi". -388 p. 69

21. 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. 3

22. Vidmachenko A.P., Steklov A.F. (2020) Mineral resources can be mined on different bodies of the Solar System. 22 International scientific conference Astronomical School of Young Scientists. December 11-12, 2020. Kyiv, Ukraine, p. 89-92.

23. 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. 2

HISTORY OF WATER ON MARS

Anatoliy Vidmachenko - Doctor of Science, Professor

Oleksandr Mozghovyi - PhD, Associate Professor

Oleksii Steklov - PhD, Senior Research Fellow

According to data from orbital modules and rovers, the stages of the development of events on Mars have been reconstructed. During the Phyllocian era, which began 4.5 billion years ago and lasted ~500-1000 million years, Mars was a wet planet, and therefore the rocks at that time were subject to water erosion. After global climate changes, possibly caused by volcanic activity, the Theikian Era began. It lasted until 3.5 billion years ago. About 3.3 billion years ago, the Siderician era began. It was at that time that large-scale formation of iron oxides began, which could give the planet a reddish color. The present-day valley and channel systems of Mars also testify to the past presence of flowing water on the surface. Therefore, it is assumed that the early Martian environment was different from the cold and dry conditions of today. Thus, the winter on Mars was almost endless and was interrupted only by short periods when it rained and great floods occurred.

Key words: Mars, atmosphere, global climate changes, geological eras, water on the planet.

МОРЯ ТА ОЗЕРА 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

Борис Грудинін – д-р фіз.-мат. наук, доцент

Раніше на поверхні Марса була вода, текли річки, могла бути значна кількість кисню. Атмосфера та вода були втрачені після потужного бомбардування великими метеороїдами. А знайдений у марсіанських породах гематит вказує на те, що у товщі вічної мерзлоти можуть існувати умови для утворення озер із рідкої води. Вони мають можливість підігріватися локальною тектонікою. Глибокі підземні області могли бути й місцями для біологічної діяльності. На переданих з Марса фотознімках гірських масивів планети було, можливо, зафіксоване величезне крижане море, під льодом якого може й зараз бути вода. Розрахунки показали, яку саме кількість геотермального тепла необхідно для досягнення значень температури, при якій рідка суміш перхлоратів з водою не замерзала б під дослідженою кількістю льоду.

Ключові слова: Марс, зміни клімату, вода на планеті, локальна тектоніка, крижане море.

Вважають, що раніше на поверхні Марса була вода, текли повноводні річки, могла бути значна кількість кисню, завдяки якому Марс і міг набути червоного кольору [25]. За одним з припущень, атмосфера та вода [19, 27] були втрачені після потужного

одноразового бомбардування великими метеороїдами, котрі могли з'явитися після гравітаційного розриву гіпотетичного третього супутника Марса – Танатоса («Смерть»). Саме тоді атмосферний кисень окислив місцеві породи, і тому там переважають темні породи (андезіти і базальти з високим вмістом оксиду заліза у складі силікатних мінералів); а основу поверхневого ґрунту становлять продукти вивітрювання із червоно-бурих оксидів заліза із домішками глини та сульфатів кальцію й магнію. Про можливе бомбардування говорять існуючі метеорні кратери, та велика кількість на поверхні магнітного піску (магнетиту), котрий утворюється при окисленні магнетиту за одночасного сильного нагрівання. А знайдений у марсіанських породах гематит [7, 23] свідчить про гідротермальну активність, причому у відносно недавню історичну епоху.

Наявність цього мінералу може вказувати на те, що у товщі вічної мерзлоти можуть існувати умови для утворення досить великих (завтовшки у 30-100 м з діаметрами до 10 км) озерних лінз із рідкої води, котрі мають можливість підігріватися локальною тектонікою. У деяких випадках лінзи можуть перегріватися і навіть закипіти. Тоді раптове витіснення води масою понад 10^9 тон на поверхню може привести до формування катастрофічного селевого потоку, який створив би глибокий каньйон. Істотним є те, що у такому випадку тектиме вже не рідка вода, а суміш грязі, льоду й пари; причому, такі витoki відбуватимуться лише епізодично. Але щоб пояснити таким механізмом реальний марсіанський рельєф, необхідно виконати докладні чисельні розрахунки.

Зараз на Марсі є зумовлена ексцентриситетом ($e=0.09$) асиметрія зміни сезонів [13] у півкулях, коли зміна сонячного потоку між афелієм і перигелієм досягає 40%. Тому літо в північній півкулі довше й холодніше, ніж у південній. На відносно невеликій висоті в атмосфері (нижче 10 км) домінують направлені до екватора повітряні потоки глобального конвективного переносу. На Землі – це так звані пасатні вітри. Вище за рівень конденсації вода не проникає через швидке гравітаційне осідання мікронних кристалів конденсату. Цей ефект приводить, зокрема, до утворення в афелії тропічного поясу хмар, який зберігає випаровану полярною шапкою воду в північній півкулі. Водночас у перигелії (у набагато тепліший період часу) хмари слабко впливають на перенос між півкулями, і тому вода, що випаровується з південної полярної шапки, переміщується рівномірніше. За геологічно короткий час такий сезонний «насос» цілком міг би перекачати воду до тієї півкулі, літо в якій припадає на проходження афелію орбіти [24].

Про наявність підповерхневого льоду свідчить приклад сублімації, коли твердий лід одразу перетворюється на пару, минаючи рідкий стан. Наприклад, лід, який знайшов космічний апарат (КА) «Фенікс», лежав на глибині всього у 7-8 см під шаром бурого-рудого ґрунту, недалеко від межі полярної шапки; вона зменшилася з приходом заполярного літа. Розрахунки показали, що вода є і на широтах менших від 60° , але на глибині понад 20-30 см. Із аналізу спектральних даних з'ясували, що насправді замерзла суміш складається лише із близько одного відсотка грязі та водяного льоду. І тут не йдеться про якесь дуже далеке «вологе минуле» Марса у мільярди років тому [26]. Таким чином, лід є не лише на полюсах, але й поблизу екватора. Наявність льоду тут пояснюється дуже низькою теплопровідністю ґрунту, через яку за добу ґрунт прогрівається лише на дуже невелику глибину.

Відкладення, багаті філосилікатами, утворилися на Марсі ще в давній геологічний період, який закінчився приблизно 3.8-3.5 млрд років тому. Передбачається, що у той час на Марсі була достатньо багато води і вона навіть могла бути присутньою на поверхні в рідкому вигляді. Згодом змінені водою породи були покриті вулканічними лавовими полями. У наш час ерозія лише в деяких місцях оголила стародавні породи, які містять філосилікати.

Сліди, які свідчать про те, що глибоко під поверхнею Марса колись давно перебувала вода, проявилися завдяки розломам, викидам і зсувам, виявленим на поверхні планети. Ці глибокі підземні області могли бути й місцями для різноманітної біологічної

діяльності, яка, можливо, там відбувалася [20-22]. Тому вони (разом із ділянками Марса, покритими глинистими матеріалами) можуть бути ще одним перспективним місцем для пошуку слідів життя. Тим більше, що такі ж смужки уздовж тріщин і зламів поверхні були виявлені не тільки на знімках Candor Chasma, але й у декількох інших районах планети. Перспективне зображення області Echus Chasma свідчить про те, що, у всякому разі на цій частині поверхні Марса, рідка вода була ще мільярд років тому. Пізніше, планета остигла, озера замерзли і сформували льодовики, які своїми потоками й «порізали» долину Kasei Valles [16, 17].

Через відсутність порівняно невеликих потоків в марсіанських мережах долин можна вважати, що долини утворилися перш за все водою, що витікає з-під ґрунту, а не у результаті випадання опадів. Хоча рідка вода у даний час на поверхні Марса надзвичайно нестійка, та теоретичні дослідження показують, що повільна ґрунтова вода все ж могла б сформувати мережі долин у випадку, якщо б вода витікала, наприклад, з-під замерзлої криги [15]. Оскільки такі долини обмежені відносно старими регіонами Марса, то їх присутність, можливо, вказує на те, що Марс колись все ж мав теплий і вологий клімат у його ранній історії.

А на початку осені 2000 року на переданих з Марса фотознімках [12, 14] гірських масивів планети було, можливо, зафіксоване величезне крижане море, під льодом якого може й зараз бути вода (Рис. 1).

У середніх широтах Марса зараз зосереджена помітна потокова активність. Тобто, отримані останнім часом спостережені дані показують, що й сьогодні Марс є геологічно активнішим небесним тілом, ніж це уявлялося раніше [1, 2]. Оскільки шкідливий вплив іонізуючого випромінювання на клітинну структуру є ще одним із важливих факторів, що обмежують виживання можливих життєвих форм на поверхні планети, то найкращими потенційними місцями для їх виявлення можуть бути підземні середовища на Марсі.

У вересні 2019 року появилися повідомлення, що апаратурою посадкового модуля «InSight» були виявлені незрозумілої природи магнітні імпульси та магнітні коливання, які можуть відповідати значному резервуару із рідкою водою глибоко під поверхнею. Гіпотеза про існування підльодовикових озер на Марсі була висунута тоді, коли при моделюванні можливості наявності озера в Антарктиді вдалося показати, що таке озеро цілком могло існувати у часи до заледеніння в Антарктиді. Вважають, що подібний сценарій потенційно міг мати місце і на Марсі. У липні 2018 р. було повідомлено, що на 1.5 км нижче верхнього рівня південної полярної крижаної шапки було виявлено підльодовикове озеро на Марсі. Воно мало близько 20 км по горизонталі, і стало першим доказом стабільності такої маси рідкої води на цій планеті [8]. Доказом існування марсіанського озера стало отримання яскравої плями за даними радіолокатора (РЛ) MARSIS на борту космічного апарату (КА) «European Mars Express» [8], отриманими у 2012-2015 рр. Виявлене озеро розташоване на широті 81°S на рівнинній місцевості без особливих топографічних характеристик. Місцевість оточена підвищеннями [8].

У 2020 р. відкриття РЛ MARSIS вдалося підтвердити з допомогою нових отриманих даних та проведеного повторного аналізу всіх існуючих результатів. Ці додаткові радарні дослідження повідомили про наявність там ще трьох підлідних озер. Вони також розташовуються на 1.5 км нижче верхнього рівня південної полярної крижаної шапки. Розміри найбільшого найпершого знайденого озера було скориговано до 30 км у діаметрі. Кожне з трьох менших озер мають діаметри по кілька кілометрів [5]. Оскільки температура на поверхні полярної шапки була близько 205 К, то зрозуміло, що вода могла залишатися в озерах у рідкому стані лише завдяки ефектам, викликаним наявністю там антифризу із перхлоратів магнію та кальцію [8-10].

Півтора кілометровий шар замерзлої речовини над озерами, складається з водяного льоду, який має 10-20% домішок із пилу. Крім того, цей шар зверху ще й сезонно покривається 1-метровим шаром льоду CO₂ [8].

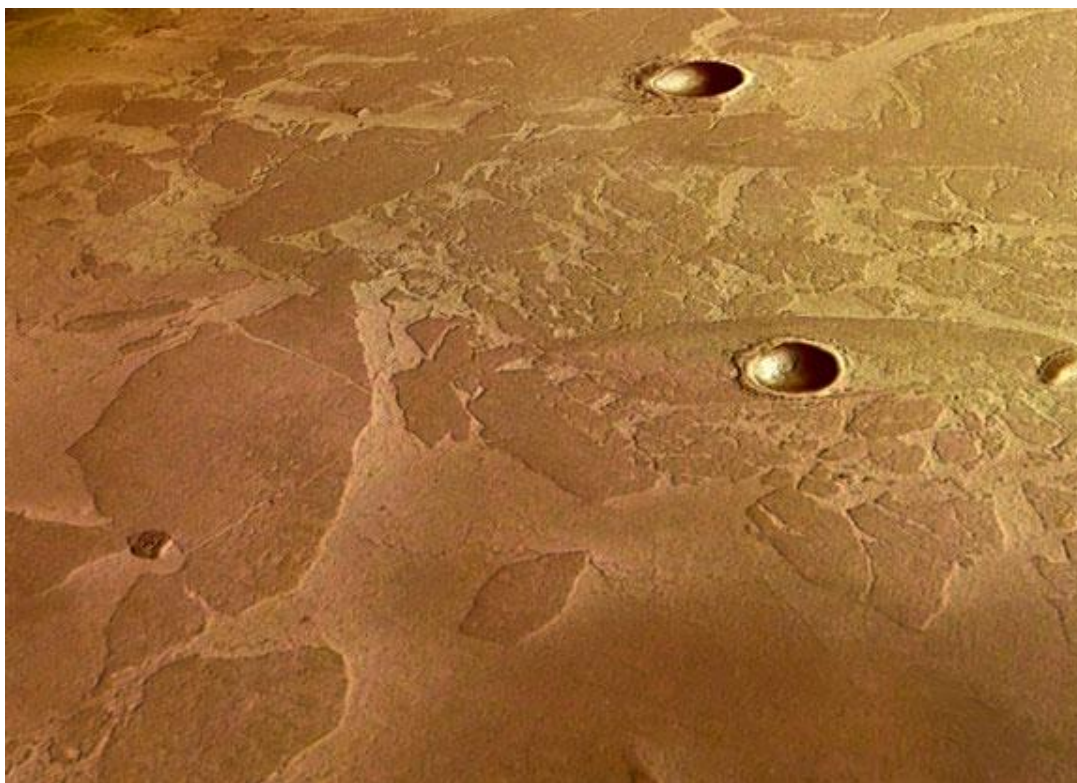


Рис. 1. Можливе замерзле море на Марсі поблизу екватора (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>)

У 2019 році було опубліковано дослідження, у котрому розглядалися фізичні умови, які були б необхідні для утворення і тривалого існування подібних озер [11].

Розрахунки показали, яку саме кількість геотермального тепла необхідно для досягнення значень температури, при якій рідка суміш перхлоратів з водою не замерзала б під дослідженою кількістю льоду. У роботі [6, 11] отримано висновок, що навіть при існуванні локальних концентрацій значної кількості перхлоратів під південною полярною льодяною шапкою, існуючі умови на Марсі є надто холодними для того, щоб там можна було розтопити лід для додаткового збільшення кількості рідкої води без наявності локального джерела тепла в марсіанській корі. Причому, для цього потрібне джерело підвищеної температури типу, наприклад, магматичної камери у межах до 10 км від місця розташування льоду, який потрібно розтопити.

Такий результат засвідчує факт того, що якщо інтерпретація отриманих спостережних даних щодо наявності рідкої води є правильною, то гарячий магматизм у мантиї Марса міг бути досить активним зовсім нещодавно.

Відмітимо, що якщо рідке водяне озеро існує насправді, то його вода може бути перемішана з ґрунтом та утворити мул. І хоча висока солоність води в цьому озері може створити певні труднощі для переважних форм життя [18]. Але на Землі й зараз існують такі організми, як галофіли. Вони досить добре почуваються в умовах із надзвичайно високою солоністю води. Хоча тут все ж не так темно і холодно, як на Марсі, та й перхлоратні розчини не настільки концентровані [3]. Але все ж, галофільні організми мають можливість справлятися із такими підвищеними концентраціями перхлоратних солей [4].

Одним із можливих пояснень даних радіолокаційних спостережень у Голдстоуні ще в 1971 і 1973 рр. про аномальну за відбивною здатністю деталей на Марсі у районі Solis Lacus, із надзвичайно гладкою поверхнею, також є присутність там рідкої води на глибині всього близько 0.5-1 м [6].

Список використаних джерел:

1. Carr M.H. (1996) Channels and valleys on Mars: cold climate features formed as a result of a thickening cryosphere. *Planetary and Space Science*. 44(11), p. 1411-1417.
2. Clifford S.M., Parker T.J. (2001) The Evolution of the Martian Hydrosphere: Implications for the Fate of a Primordial Ocean and the Current State of the Northern Plains. *Icarus*, 154(1), p. 40-79.
3. 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.
4. Heinz J., Doellinger J., Maus D., Schneider A., Lasch P., Grossart H.-P., Schulze-Makuch D. (August 10, 2022) Perchlorate-specific proteomic stress responses of *Debaryomyces hansenii* could enable microbial survival in Martian brines. *Environmental Microbiology*, 24(11), p. 5051-5065.
5. Lauro S.E., Pettinelli E., Caprarelli G., et al., (2020) Multiple subglacial water bodies below the south pole of Mars unveiled by new MARSIS data. *Nature Astronomy*. 5, p. 63-70.
6. Leverington D. W., Ghent R. R. (2004) Differential subsidence and rebound in response to changes in water loading on Mars: Possible effects on the geometry of ancient shorelines. *Journal of Geophysical Research: Planets*. 109(E1), p. 1-10.
7. 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.
8. Orosei R., Lauro S.E., Pettinelli E., et al. (2018) Radar evidence of subglacial liquid water on Mars. *Science*, 361(6401), p. 490-493.
9. 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.
10. Salese F., Pondrelli M., Neeseman A., Schmidt G., Ori G.G. (2019) Geological Evidence of Planet-Wide Groundwater System on Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*. 124 (2), p. 374-395.
11. Sori M.M., Bramson A.M. (2019) Water on Mars, With a Grain of Salt: Local Heat Anomalies Are Required for Basal Melting of Ice at the South Pole Today. *Geophysical Research Letters*. 46(3), p. 1222-1231.
12. 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.
13. Vidmachenko A.P. (2009) Planetary atmospheres. *Astronomical School's Report*. 6(1), p. 56-68.
14. Vidmachenko A.P. (2009) Research of the Mars by space vehicles. 11 ISCo AS YS, May 26-29, 2009, Kherson, Ukraine. P. 11-12.
15. Vidmachenko A.P. (2009) Water on Mars. *Astronomical almanac*. 56, p. 225-249.
16. Vidmachenko A.P. (2016) Activity of processes on the visible surfaces of Solar System bodies. *Astronomical School's Report* 12 (1), p. 14-26.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. Vidmachenko A.P. (2018) Water in Solar system. 20 ISCo AS YS. May 23-24, 2018. Uman, Ukraine, p. 91-93.

24. 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. Main Astronomical Observatory NAS of Ukraine, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Kyiv, Publishing House "Profi". -388 p.

25. 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.

26. Vidmachenko A.P., Steklov A.F. (2020) Mineral resources can be mined on different bodies of the Solar System. 22 International scientific conference Astronomical School of Young Scientists. December 11-12, 2020. Kyiv, Ukraine, p. 89-92.

27. 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.

SEAS AND LAKES ON MARS

Anatoliy Vidmachenko – Doctor of Science, Professor

Oleksandr Mozghovyi – PhD, Associate Professor

Oleksii Steklov – PhD, Senior Research Fellow

Borys Grudynin – Doctor of Science, Associate Professor

Previously, there was water on the surface of Mars, rivers flowed, and there could be a significant amount of oxygen in its atmosphere. The atmosphere and water were lost after a heavy bombardment by large meteoroids. And the hematite found in the Martian rocks indicates that the permafrost layer may have conditions for the formation of liquid water lakes. They can be heated by local tectonics. Deep underground areas could also be places for biological activity. Photographs of the planet's mountain ranges transmitted from Mars may have recorded a huge sea of ice, under which there may still be water. Calculations showed exactly what amount of geothermal heat is necessary to reach the temperature values at which the liquid mixture of perchlorates and water would not freeze under the investigated amount of ice.

Key words: Mars, climate changes, water on the planet, local tectonics, icy sea.

ВОДА ТЕЧЕ ПО ПОВЕРХНІ МАРСА Й ЗАРАЗ

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

Олександр Мозговий – канд. техн. наук, доцент

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

Пошук води на Марсі є одним із важливих завдань марсіанських експедицій. Вода під поверхнею відіграла важливу роль у формуванні структур рельєфу на поверхні. Проведені космічними апаратами дослідження показують, що раніше на поверхні Марса були умови, при яких там існувала рідка вода. Існуючі русла річок могли утворитися при виверженнях із підземних резервуарів через тріщини у льоду, або внаслідок повільного просочування ґрунтових вод з під поверхні. Дослідження доводять, що під поверхнею знаходиться багато льоду, а можливо й вода у рідкому стані. Тобто Марс є геологічно активнішим, ніж це уявляли раніше.

Ключові слова: Марс, зміни клімату, вода на планеті, русла річок, геологічна активність.

Пошук води на Марсі визнано одним із найважливіших завдань усіх марсіанських експедицій. Крім того, що виявлення водних джерел на поверхні Марса мало б величезне значення для астробіології, здатність планети підтримувати життя [9, 16, 18-20] подало б неоціненну підтримку тим, хто закликає уряди Землі задуматися над космічною експансією [6, 7]. І якщо на Марсі дійсно є досяжні джерела води, то здійснити такі програми було б набагато простіше. Наявність води під поверхнею Марса відіграла