

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 CO₂; 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 докілья 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

можливе бомбардування говорять існуючі ударні кратери, і велика кількість маггеміту – так званого магнітного піску на поверхні. Він утворюється при окисненні магнетиту під час сильного нагрівання. Свідченням удару великого астероїда по Марсу є рівнина Еллада, розташована поруч із південною полярною областю. Зараз це басейн із діаметром більше 4000 км, що звужується донизу до майже 1500 км. Він оточений кільцем викинутих порід [14]. Глибина цього басейну подекуди перевищує 9 км [21]. Теорія та відповідні розрахунки дозволили реконструювати сценарій утворення Еллади та відновити параметри удару астероїда по планеті. З'ясували, що при ударі мала утворитися значна ударна хвиля, яка пройшла до протилежної частини планети сферичної форми та сфокусувалася симетрично до кратеру Еллада. У результаті цього був утворений найвищий у Сонячній системі вулкан Олімп.

Системи сучасних долин і каналів Марса також свідчать про минулу присутність проточної води на поверхні [1]. Тому припускають, що раннє марсіанське середовище відрізнялося від холодних і сухих умов сьогодення [3]. Поява проточної води на Марсі в минулому свідчить про те, що вода, ймовірно, збиралася у водозбірних басейнах. Адаже є переконливі докази на підтримку існування найбільших гіпотетичних водойм [2]. Потенційно значні наслідки, пов'язані з водним навантаженням, здебільшого не враховувалися при ідентифікації та оцінці потенційних прибережних особливостей, а також при визначенні можливих форм басейну та вірогідних співвідношень між передбачуваними рівнями води та рівнями притоків і витоків. В роботі [4] обговорюються наслідки від розташування та геометрії можливих збережених матеріалів берегової лінії Марса (Рис. 1).

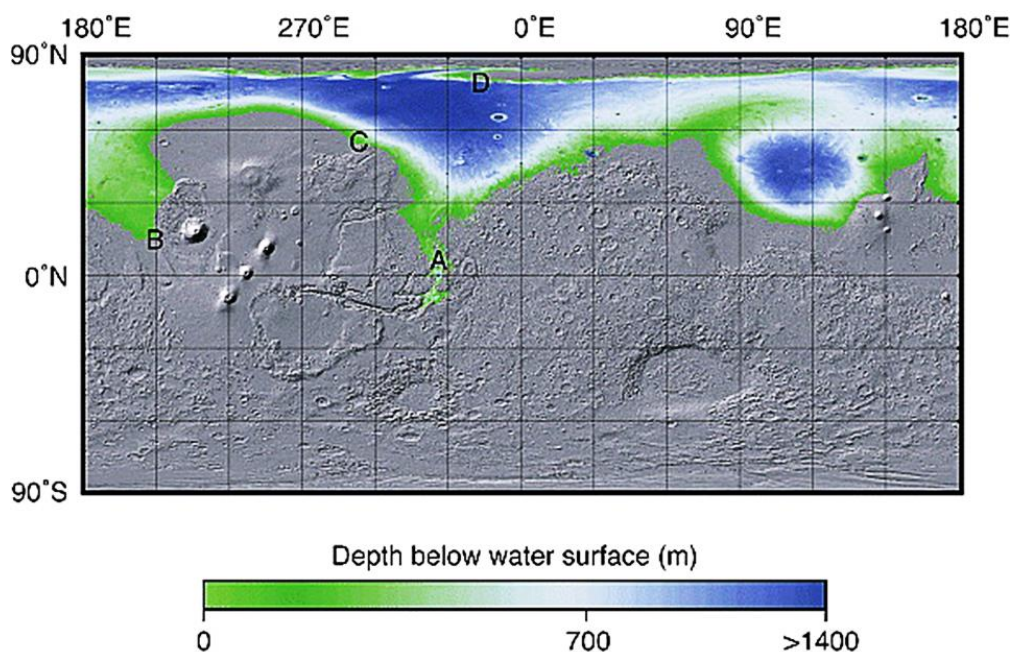


Рис. 1. Опускання поверхні у відповідь на зміни навантаження від води на Марсі: можливий вплив на геометрію стародавньої берегової лінії [4]

У лютому 2019 року були опублікували геологічні докази стародавньої загальнопланетної системи підземних вод, яка, ймовірно, була пов'язана з передбачуваним величезним океаном [7]. А у вересні того ж року повідомили, що посадковий модуль «InSight» виявив магнітні коливання, що відповідають загальнопланетному резервуару рідкої води глибоко під поверхнею.

Визначений за даними спектрометрії з марсоходів «Спіріт» і «Оппорт'юніті» склад різних сполук заліза на поверхні Марса також вказав на можливу наявність води в

минулому [20]. За цими ж даними вперше було виявлено карбонати, які входять до складу восьми десятків мінералів Землі і складають близько 2% її маси, та які утворюються лише за наявності води й вуглекислого газу. Це також підкріпило гіпотезу, за якою в далекому минулому на Марсі мали бути великі запаси рідкої води. Аналіз зразків каменю «El Capitan» виявив сульфати й мінерали, які могли утворитися лише в присутності води. Пізніше подібне відкриття зробив марсохід «Спіріт», який просвердлив камінь «Humphrey» і виявив там порожнечі, що могли утворитися лише під дією води. А в самих порожнечах були знайдені поклади мінералів, які також можуть утворюватися лише в присутності води.

Про наявність підповерхневого льоду свідчить приклад сублімації, коли твердий лід одразу перетворюється на пару, минаючи рідкий стан. Лід, який знайшов КА «Фенікс», лежав на глибині всього у 7-8 см під шаром буро-рудого ґрунту, недалеко від межі полярної шапки, яка зменшилася з приходом заполярного літа. Розрахунки показують, що вода має бути і на широтах менших 60°, але на глибині понад 20-30 см. Тоді як КА «Вікінг-2» свого часу прокопав марсіанський ґрунт лише на глибину до 15 см, і тоді льоду не виявив.

Досить вагомі докази існування води на Марсі дав аналіз одних і тих самих ділянок поверхневого шару на зображеннях, отриманих КА «Mars Global Surveyor» та «Mars реконнейсенс орбітер» у 1999, 2001 та 2004, 2005 рр., який виявив зміни, що могли бути зумовлені лише рідиною [11, 19]. Було виявлено промоїни на підсонячних схилах долин і кратерів, де спостерігалися яскраво забарвлені відкладення, яких не було раніше та які можливо є грязю, сіллю, або інієм, залишеним потоками рідини.

Це означає, що Марс є геологічно значно активнішим, ніж раніше вважалося, та що активність потоків зосереджена в середніх широтах. Адже знайдені структури не старші кількох десятків чи навіть одиниць років і нагадують сліди рідини, що просочується з-під кори вічної мерзлоти. Характерно, що всі сліди водно-селевої ерозії були виявлені на північних схилах глибоких каньйонів у північній півкулі і на південних схилах у південній півкулі, де атмосферний тиск хоч і ненадовго, але дозволяє зберегти воду від моментального холодного закипання. Вважають, що вода просочилася з тріщин, які виникли після падіння метеорита, що пробив один із численних підземних резервуарів. Кількість води, що встигла пройти сотні метрів, була еквівалентною об'єму води приблизно у 5-6 стандартних плавальних басейнах.

Зараз поверхня Марса представляється безводною й безжиттєвою пустелею, над якою лютують бурі, що здіймають пісок і пил на висоту до десятків кілометрів [5, 10]. Під час цих бур швидкість вітру може інколи перевершувати сотню метрів за секунду. Сучасне середнє значення тиску марсіанського повітря, яке становить 0.006 тиску земної атмосфери, дещо менше від потрійної точки води [9]. Це означає, що тепер на Марсі не можуть існувати відкриті водоймища, а вода на планеті міститься або в товщі ґрунту [12, 13] як вічна мерзлота, або у вигляді відкритих льодів і снігу, а також, у дуже невеликій кількості – у газоподібному вигляді в атмосфері. Водоймища, якби вони існували, неминуче б замерзли і випаровувалися. Добре відомим великим резервуаром водяного льоду на Марсі – є північна полярна шапка (Рис. 2). Верхня частина південної полярної шапки складається головним чином із замерзлої вуглекислоти. Дослідження Марса космічними апаратами «Mars Global Surveyor» й «Mars Odyssey» доводять, що під поверхневим шаром на глибині не більше 5 м знаходиться величезна кількість льоду, а місцями, можливо, є й вода у рідкому стані. Якщо б весь лід розтопити, то на думку фахівців ця вода покрила б Марс 500 метровим шаром.

На знімках Марса можна розгледіти контури каналів навіть цілий океанський басейн у північній півкулі. Нагадаємо, що річкові русла на Марсі було виявлено ще в 70-х роках минулого століття. Це означає, що в минулому клімат там був іншим, таким що рідка вода могла текти по поверхні планети. Нова спостережна інформація показує, що

такий марсіанський океан за всю геологічну історію планети при некатастрофічних подіях мав би втратити лише декілька сантиметрів. Припускали, що в періоди після катастроф Марс змінювався і протягом кількох десятиліть (щонайбільше століть) клімат ставав все теплішим і вологішим; потім холод знову повертався – і так до наступного катаклізму. Доводом на користь катастрофічного походження наявного рельєфу є те, що виявлені річкові долини практично не мають ознак притоків, які впадають в головне русло. Це свідчить про те, що річки не були такими розвиненими, як земні. Марс після кожної катастрофи неминуче знову охолоджувався, так що вода замерзала.

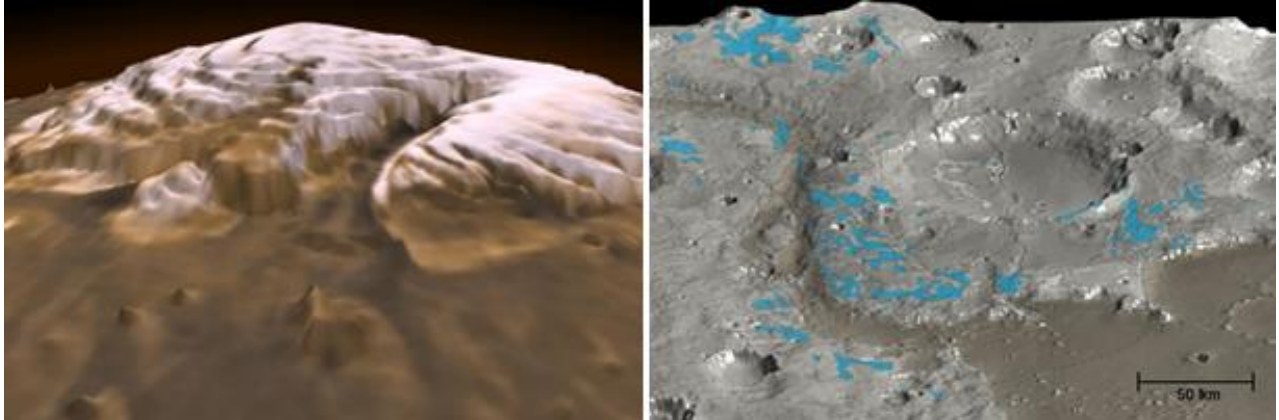


Рис. 2. Ліворуч – північна полярна шапка в комп'ютерній реконструкції за даними лазерного локатора; вертикальний масштаб збільшено приблизно в 100 разів. Праворуч – показано розташування водовмісних мінералів – філосилікатів і гідратованих сульфатів по даних, отриманих спектрометрами «OMEGA» (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>)

Таким чином зима на Марсі була майже нескінченна і порушувалася тільки короткочасними періодами, коли йшли гарячі дощі і мали місце великі повені. Однак, для того, щоб «промити» річкове русло, досить і короткочасного викиду великої водної маси, а от для зародження життя [16-18] потрібний вельми тривалий період вологого клімату. Дж. Поллак з колегами вперше висловив гіпотезу, що близько 3.5 млрд років тому на Марсі було тепло і волого, його оповивала щільна атмосфера, текли річки та бушували океани [6]. Тепер атмосферний тиск на Марсі близький до потрібної точки води. Припускають, що поки тиск перевищував це значення, в атмосфері діяв один з відомих у геохімії циклів – карбонатно-силікатний, достатньо активний на Землі. Він полягає в тому, що вуглекислий газ розчиняється в краплинах хмар, а потім осідає, переноситься в ґрунт і там бере участь у ланцюжку реакцій, зумовлюючи врешті-решт відкладення карбонатів в осадових породах. Непрямою ознакою зміни умов у півкулях у глобальному водному циклі служать концентричні шаруваті відкладення полярних шапок (Рис. 1). Не виключено, що впродовж марсіанської історії шапки багато разів мінялися місцями.

За допомогою спектрів у видимому і ближньому інфрачервоному діапазонах на поверхні Марса вдалося виявити області, що містять водовмісні мінерали філосилікати і гідратовані сульфати (Рис. 3). Обидві ці групи мінералів виникають в результаті хімічних змін гірських порід, але розрізняються механізмом утворення [8]. Філосилікати утворюються з магматичних порід при тривалому контакті з водою. Гідратовані сульфати також утворюються під впливом води. Причому ця дія не обов'язково повинна бути тривалою, та зате необхідно, щоб вода мала високу кислотність. Виявлення цих мінералів ясно вказує на те, що в минулому на поверхні Марса була присутня вода. Відкладення, багаті філосилікатами, утворилися на Марсі в давній геологічний період, що закінчився приблизно 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.

Така гіпотеза пояснює, чому ділянки, де виявлені філосилікати, не пов'язані з сухими руслами й іншими можливими слідами води на поверхні Марса. Тобто, подібні русла могли утворитися пізніше. Наявність численних звивистих долин з великою протяжністю, з притоками і островами, що нагадують висохлі русла земних річок, повинно свідчити про те, що раніше на поверхні Марса були такі умови [15], при яких була можливість для існування рідкої води на поверхні.

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. 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.
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, Houston, Texas. LPI Contribution No. 1966, 2017, id.6010. 8
6. Pollack J.B., Kasting J.F., Richardson S.M., Poliakoff K. (1987) The case for a wet, warm climate on early Mars. *Icarus*. 71(2), p. 203-224.
7. 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.
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. 11
9. Vidmachenko A.P. (2009) Planetary atmospheres. *Astronomical School's Report*. 6(1), p. 56-68. 27
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. 26
11. Vidmachenko A.P. (2009) Water on Mars. *Astronomical almanac*. 56, p. 225-249. 10
12. Vidmachenko A.P. (2016) Activity of processes on the visible surfaces of Solar System bodies. *Astronomical School's Report* 12 (1), p. 14-26. 42
13. 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. 36
14. 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 Kostiuk". – 241 p. P. 43-48. 17
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. 23
16. 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. 11
17. 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. 28
18. 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. 11
19. Vidmachenko A.P. (2018) Water in Solar system. 20 ISCo AS YS. May 23-24, 2018. Uman, Ukraine, p. 91-93. 24

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