**М І Ф**

**Математика, Інформатика, Фізика: Наука та Освіта, Том 1, № 2 (2024), с. 120–128.**
*Mathematics, Informatics, Physics: Science and Education, Volume 1, No. 2 (2024), pp. 120–128.*
Journal homepage: https://intranet.vspu.edu.ua/miph

УДК 523.43

# Про механізми можливого періодичного перерозподілу водяного льоду між полярними шапками Марса

**Анатолій Відьмаченко[1], Олександр Мозговий[2], Олексій Стєклов[3]**

[1] Національний університет біоресурсів і природокористування України, кафедра фізики;
Головна астрономічна обсерваторія НАН України,
відділ фізики субзоряних і планетних систем, м. Київ, Україна
avidmachenko@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-0523-5234

[2] Вінницький державний педагогічний університет імені Михайла Коцюбинського,
кафедра фізики і методики навчання фізики, астрономії, м. Вінниця, Україна
mavimfto@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-0797-8779

[3] Головна астрономічна обсерваторія НАН України,
відділ фізики субзоряних і планетних систем, м. Київ, Україна
stec36@i.au
https://orcid.org/0000-0002-5149-0500

*Анотація.* У Північній полярній шапці на початку XXI століття підтвердили наявність значної кількості водяного льоду. Дещо пізніше прилади орбітального апарата «Марс-Експрес» також змогли зареєструвати чималі поклади водяного льоду й навколо Південного полюса. А над водяним льодом було знайдено шар «сухого» льоду товщиною від 2 до 7 мм. Загальні відкладення у Південній полярній шапці виявилися суттєво меншими, ніж у Північній. Спостереження з допомогою гамма-спектрометра дозволили виявити велику кількість водню, що міститься під поверхнею Марса на значних відстанях від полярних шапок, й навіть на екваторі планети. Даний водень входить до складу водяного льоду, який у таких місцях є захищеним від сублімації ґрунтом з ізоляційної породи, пилу й уламків породи. В часи літніх пилових бур значні кількості пилу підіймається внаслідок швидкого сезонного переміщення вуглекислого газу й водяної пари; через певний час цей пил осідає з атмосфери. Це приводить до сезонного накопичення пилу в шаруватих відкладеннях в обох полярних та приполярних областях. При зміні пір року на планеті, внаслідок суттєвого ексцентриситету орбіти Марса, виникає значна асиметрія в змінах притоку сонячної енергії до протилежних півкуль. Відмінності між афелієм і перигелієм досягають 40%. По цій причині, при перебуванні планети в афелії, літо у Північній півкулі є довшим та холоднішим, ніж у Південній. Через таку відмінність сезонних характеристик між південною та північною півкулями, своєрідний сезонний «насос» за відносно короткий проміжок часу може повністю перенести воду до полярної шапки у тій півкулі, в котрій літо припадає на проходження через афелій орбіти. Моделювання існуючих кліматичних процесів на Марсі вказує на те, що відкладення водяного льоду мають циклічно перерозподілятися між південною та північною полярними областями Марса протягом приблизно 21000 років. Вісь обертання Марса в циклах Міланковича могла змінювати свій нахил багато раз. Період таких змін близький до 105 років. Тому асиметрія, яка описана в роботі є молодою, що, можливо, призводить до зміни

e-ISSN 3041-1955 DOI: https://doi.org/10.31652/3041-1955/2024-01-02-03

знаку. Цілком можливо, що протягом історії Марса полярні шапки неодноразово мінялися місцями.

*Ключові слова:* Марс, водяний лід, полярні шапки, пори року, зміни клімату.

## 1. Вступ

На початку XXI століття у Північній полярній шапці було підтверджено наявність значної кількості водяного льоду (рис. 1, ліворуч). Дещо пізніше, спектрометром у видимому та інфрачервоному діапазоні «ОМЕГА» на орбітальному апараті «Марс Експрес» [16] також вдалося зареєструвати значні відкладення водяного льоду навколо Південного полюса [1]. Вони розташовуються поверх осадових порід [33] віком у кілька мільйони років. Це вказує на відносно недавнє переміщення льодовиків. Над водяним льодом у Південній полярній шапці (рис. 1, праворуч) є поверхневий шар «сухого льоду» CO2 товщиною лише 2-7 мм. Тоді як у Північній полярній шапці шар замерзлої вуглекислоти на порядок більший [2].

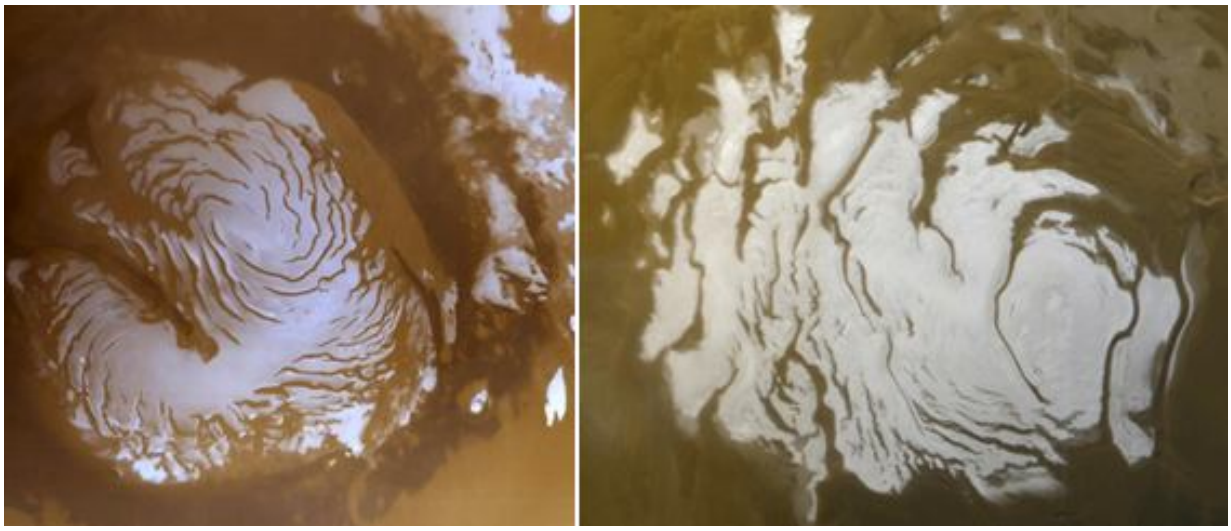

Рис. 1. Північна полярна шапка діаметром приблизно 1100 км марсіанським літом 13.03.1999 - ліворуч. Південна полярна шапка діаметром приблизно 420 км марсіанським літом 17.04.2000 – праворуч (http://photojournal.jpl.nasa.gov/)

## 2. Постановка проблеми

А за допомогою гамма-спектрометра була виявлена велика кількість водню під поверхнею Марса у полярних і помірних широтах. Водень входить до водяного льоду навіть далеко від полярних шапок [4]. А отже, запаси води, які виявлені в обох півкулях, можуть бути величезними [12, 17, 18]. Останні спостережні дані показали, що льодовики з водяного льоду існують також на середніх широтах Марса (особливо в кратерах високих вулканів [19, 20, 22]) і навіть в екваторіальній області. У таких місцях водяний лід є захищеним від сублімації ґрунтовими покриттями із ізоляційних порід, пилу [5-9] та уламків порід. Через сучасні температурні умови, лід на Марсі прагне не танути, а примерзати до поверхні і через це поступово підніматися над середнім рівнем поверхні. Зазвичай такого типу замерзлі льодовики повторюють основний рельєф поверхні [19, 23, 26, 29, 30] (рис. 2).

Метою роботи є встановлення механізмів можливого періодичного перозподілу водяного льоду між полярними шапками Марса.

## 3. Основні результати

Як показали дистанційні спостереження [10], при піднятті літніх пилових бур [32] вітром пил піднімається досить високо в атмосферу. Там він сезонно переміщується в атмосфері із вуглекислого газу та невеликих кількостей водяної пари, а потім знову осідає на поверхню. По цій причині пил сезонно накопичується у шаруватих відкладеннях в обох полярних регіонах (рис. 1). Підтвердженням цього факту вважали спостережувану закономірність при формуванні окремих шарів намерзання в приполярних областях. Це засвідчує періодичні зміни у їх формуванні. Й це є відображенням деяких кліматичних змін, викликаних, наприклад, наявністю ексцентриситету орбіти Марса [31]. Влітку кожного наступного марсіанського року при випаровуванні порівняно тонкого шару вуглекислоти відкриваються глибші шари із замерзлою водою [21, 34]. Протягом літа водяний лід знову покривається тонким шаром пилу та «сухого» льоду.

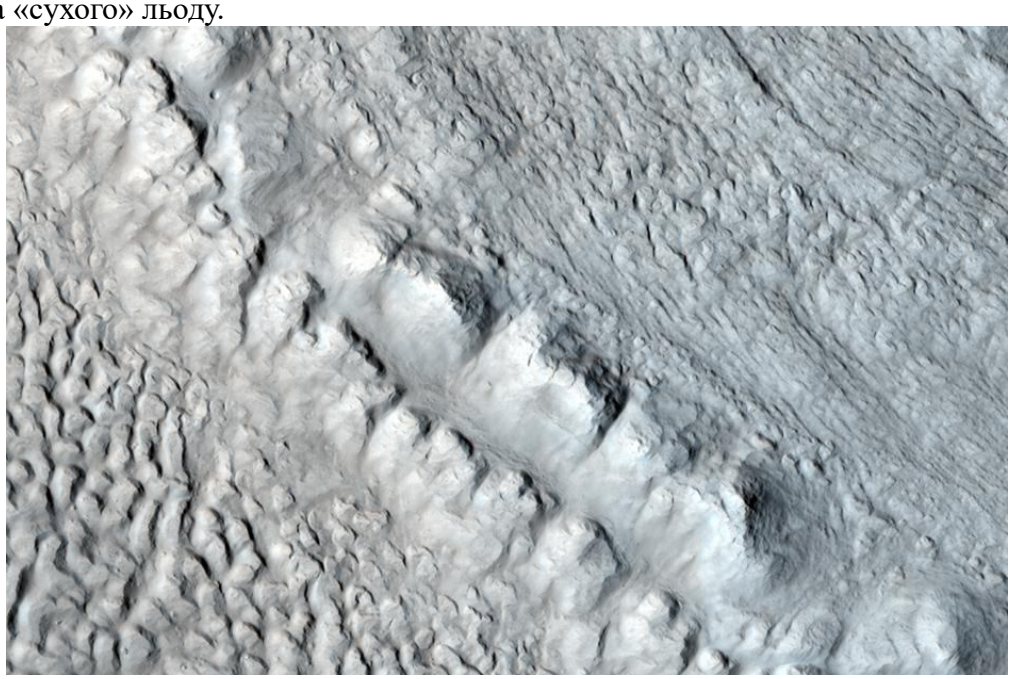

Рис. 2. Крупний план льодовика в Ismenius Lacus, як його бачить «HiRISE»; його місце розташування 42.2 N та 49.4 E (http://www.uahirise.org/ESP01 8857 2225)

Через ексцентриситет орбіти Марса (e=0,09) під час зміни пір року на планеті [11, 14] спостерігається асиметрія змін сонячного потоку до протилежних півкуль між афелієм та перигелієм на 40 %. З цієї причини в афелії літо у Північній півкулі є довшим та холоднішим, ніж у Південній. Наявність таких відмінностей у фізичних характеристиках нижніх шарів атмосфери [3, 13, 26] викликає на висотах нижче 10 км конденсацію водяної пари в атмосфері. Тому там переважають повітряні потоки, які спрямовані до екватора, при глобальному конвективному переносі [20]. Це приводить до появи тропічного поясу хмар при перебуванні Марса в афелії. Він утворюється за участі води, яка випарувалась із Північної полярної шапки. У моменти, коли Марс перебуває поблизу перигелію, на планеті спостерігаються значно тепліші умови. Тоді хмари майже не утворюються, і перенесення атмосферних мас [15] між півкулями майже не відбувається. З цієї причини вода, яка випарувалася із Південної полярної шапки, перемішується в атмосфері значно рівномірніше, без суттєвого переміщення по планеті. Завдяки такій відмінності сезонних характеристик між північною та південною півкулями подібний сезонний «насос» за геологічно короткий проміжок часу може повністю «перекачати» воду до полярної шапки у тій півкулі, в котрій літо припадає на момент проходження афелію орбіти.

Ретельне моделювання кліматичних процесів на Марсі показало, що процеси відкладення водяного льоду могли циклічно його перерозподіляти між північною та південною полярними шапками Марса протягом останніх 21000 років (рис. 3). Такий інтервал часу було розраховано виходячи із коливань нахилу осі обертання планети (прецесії). Результати цього моделювання показали, що протягом вищенаведеного часу вода в Північній полярній шапці перебувала в досить нестабільних умовах, і тому могла переміщуватися до Південної полярної шапки у вигляді пари; там вона знову конденсувався на поверхню. Це приводило до накопичення протягом року у Південній полярній шапці водяного льоду товщиною до 1 мм. В результаті за 10 тисяч років утворився шар водяного льоду, товщина якого вже становила 6 м. Цикл прецесії планети приблизно 10 тисяч років тому змінився і став повертатися до теперішньої конфігурації. Біля 1000 років тому вуглекислий газ знову розпочав сезонно намерзати поверх шару водяного льоду у Південній полярній шапці та блокувати рух водяної пари до протилежного полюса.

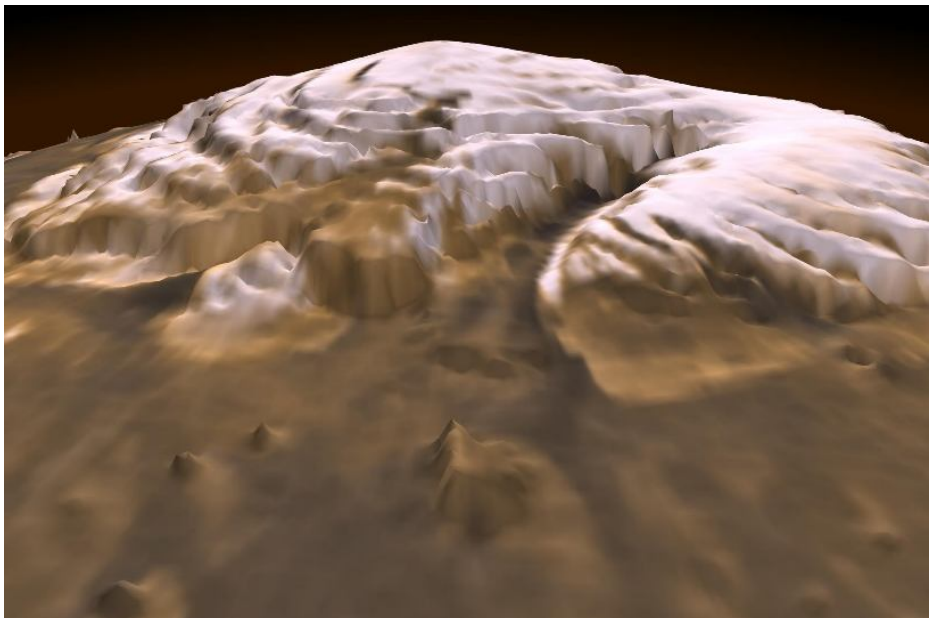

Рис. 3. За даними лазерного локатора в комп’ютерній реконструкції представлена Північна полярна шапка; масштаб по вертикалі збільшений у 100 разів (http://photojournal.jpl.nasa.gov/)

**Висновки.** Вісь обертання Марса могла змінювати свій нахил багато разів у так званих циклах Міланковича. Період таких змін становить приблизно 105 років. Тому можна припустити, що асиметрія, яка описана вище, є на даний час молодою і можлива навіть зміна знаку. Підтвердженням такої зміни глобального кругообігу води між півкулями є концентричні шаруваті відкладення в обох полярних шапках (рис. 1). Цілком можливо, що протягом історії Марса вигляд полярних шапок багато разів обмінювався місцями. Останнім часом вважають, що для стабілізації глобального кругообігу води має бути інтенсивний локальний обмін водяного льоду. Водночас він відіграє роль своєрідного дисипативного фактору. Сезонна міграція води навіть до екватора не відбувалася, коли б марсіанський реголіт не міг «дихати». Адже тоді вода навіть на межі полярних шапок відразу потрапляла б у своєрідні холодні пастки.

**Конфлікт інтересів і етика.** Автори заявляють, що не мають конфліктів інтересів. Автори також заявляють про повне дотримання всіх правил етики журнальних досліджень, а саме щодо анонімності участі людей та/або згоди на публікацію.

**Подяки.** Автори заявляють про відсутність спеціального фінансування цієї роботи.

## Список використаних джерел

1. Becerra P., Sori M. M., Thomas N., et al. Timescales of the climate record in the south polar ice cap of Mars. *Geoph. Res. Letters*. 2019. Vol. 46, № 13. P. 7268-7277.
2. Conway S. J., Hovius N., Barnie T., et al. Climate-driven deposition of water ice and the formation of mounds in craters in Mars' north polar region. *Icarus*. 2012. Vol. 220, № 1. P. 174–193.
3. Dlugach J. M., Morozhenko A. V., Vid'Machenko A. P., Yanovitskij E. G. Investigations of the optical properties of Saturn's atmosphere carried out at the main astronomical observatory of the Ukrainian Academy of Sciences. *Icarus*. 1983. Vol. 54 (May). P. 319-336.
4. Howard A. The role of eolian processes in forming surface features of the Martian polar layered deposits. *Icarus*. Vol. 144. P. 267-288.
5. Morozhenko A. V., Vid'machenko A. P. Polarimetry and Physics of Solar System Bodies. *Proceedings of the NATO Advanced Study Institute*, м. Ялта, 20 вересня - 4 жовтня 2003 р. Ялта, 2003. С. 369-384. DOI: https://doi.org/10.1007/1-4020-2368-5_16
6. Morozhenko A. V., Vid'machenko A. P. Polarimetry and Physics of Solar System Bodies. *Photopolarimetry in Remote Sensing,* NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry. 2005. Vol. 161. P. 369-384.
7. Morozhenko A., Vidmachenko A., Kostogryz N. Polarimetry and Physics of Solar System Bodies. *Proceedings of the International Astronomical Union 10 (H16)*. 2012. P. 182-182.
8. Morozhenko A. V., Vidmachenko A. P. 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.* LPI Contribution. Houston, Texas, 13-15 June, 2017. No. 1966. Houston, Texas, 2017. id.6010.
9. Мороженко А. В., Відьмаченко А. П. Пил може вплинути на освоєння Марса. *22 Міжнародна наукова конференція "Астрономічна школа молодих вчених"*. М. Київ, Україна, 11-12 грудня 2020 р. Київ, 2020. С. 71-73.
10. Morozhenko A. V., Vidmachenko A. P., Kostogryz N. M. Spectrophotometric properties of Moon's and Mars's surfaces exploration by shadow mechanism. *Highlights of Astronomy*. 2015. Vol. 16. P. 182-182.
11. Стеклов А. Ф., Видьмаченко А. П., Миняйло Н. Ф. Сезонные изменения в атмосфере. Сатурна. *Письма в Астрон. журн*. 1983. Т. 9, № 2. С. 11-17.
12. Vid'machenko A. P., Morozhenko A. V. 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. 36 *Annual Lunar and Planetary Science Conference*. League City, Texas, March 14-18, 2005. League City, 2005. #1015.
13. Видьмаченко А. П. Проявление сезонных изменений в атмосфере Сатурна. *Кинематика и физика небесных тел.* 1987. Т. 3, № 6. С. 9-12.
14. Видьмаченко А. П. Изменения блеска небесных объектов по астрономическим наблюдениям горы Майданак. *Кинематика и физика небесных тел.* 1994. Т. 10, № 5. С. 52-56.
15. Vidmachenko A. P. Planetary atmospheres. *Astronomical School's Report*. 2009. Vol. 6, № 1. P. 56-68.

16. Vidmachenko A. P. Research of the Mars by space vehicles. *Astronomical School's Report*. Vol. 6, № 1-2. P. 131-137.

17. Vidmachenko A. P. Water on Mars. *Astron. almanac*. 2009. Vol. 56. P. 225-249.

18. Відьмаченко А. П. Дослідження землеподібних планет. *16 Міжнародна наукова конференція* "*Астрономічна школа молодих вчених"*, м. Кіровоград, 29-31 травня 2015 р. Кіровоград, 2015. С. 12-13.

19. Відьмаченко А. П. Порівняльні особливості вулканів на тілах Сонячної системи. *20 Міжнародна наукова конференція "Астрономічна школа молодих вчених"*, м. Умань, 23-24 травня 2018 р. Умань, 2018. С. 9-12.

20. Відьмаченко А. П. Сучасна вулканічна діяльність на Місяці. *20 Міжнародна наукова конференція* "*Астрономічна школа молодих вчених"*, м. Умань, 23-24 травня 2018 р. Умань, 2018. С. 5-7.

21. Відьмаченко А. П. Вода в Сонячній системі. *20 Міжнародна наукова конференція* "*Астрономічна школа молодих вчених"*, м. Умань, 23-24 травня 2018 р. Умань, 2018. С. 91-93.

22. Vidmachenko A. P. Comparison of features of impact and volcanic craters on the surface of Mars. *Proceedings of VIII ISPCo "Progressive research in the modern world"* (April 27-29, 2023), Boston, USA. Chapter 43. Boston: BoScience Publisher, 2023. P. 237-246.

23. Vidmachenko A. P. Coordinates and names of surface details on Mars. *Proceedings of VII ISPCo. "Science and technology: problems, prospects and innovations"*. Osaka, Japan (April 13-15, 2023). Osaka: CPNPublishing Group, 2023. Vol. 39. P. 217-226.

24. Vidmachenko A. P. History of possible climate change on Mars. *Proceedings of VII ISPPCo. "Science and innovation of modern world"*. London, United Kingdom (23-25 March, 2023). Chapter 54. London: Cognum Publishing House, 2023. P. 336-345.

25. Vidmachenko A. P. Macrorelief of the surface of Mars. Proceedings of XIV ISPCo. *"Prospects for the development of science and the environment"*. Helsinki, Finland (April 10-12, 2023). Ch. 7. Helsinki, 2023. P. 34-39.

26. Vidmachenko A. P. The atmosphere of Mars. Proceedings of VI ISPCo. *"Scientific research in the modern world"*. Toronto, Canada (April 6-8, 2023). Chapter 45. Toronto: Perfect Publishing, 2023. P. 283-293.

27. Vidmachenko A. P. Thermal properties of the surface of Mars. *Proceedings of VII ISPCo.* "*Progressive research in the modern world*" (March 29-31, 2023), Boston, USA. Chapter 42 Boston: BoScience Publisher, 2023. P. 243-252.

28. Vidmachenko A. P., Dlugach Z. M., Morozhenko A. V. Nature of the optical nonuniformity in Saturn's disk. *Solar System Research*. 1984. Vol. 17, № 4. P. 164-171.

29. Vidmachenko A. P., Klimenko V. M., Morozhenko A. V. Apparent spectral albedos of the disk of Mars in September-October 1977. *Solar System Research*. 1981. Vol. 14, № 4. P. 157-159.

30. Відьмаченко А. П., Мозговий О. В., Стєклов О. Ф. Особливості рельєфу поверхні Марса. *Матеріали 11 Всеукраїнської НКО «Астрономія і сьогодення*», м. Вінниця, 12 квітня 2023 р. Вінниця: ТОВ «ТВОРИ», 2023. С. 66-71.

31. Відьмаченко А. П., Мозговий О. В., Стєклов О. Ф. Історичні аспекти кліматичних змін на Марсі. *Матеріали 11 Всеукраїнської НКО «Астрономія і сьогодення*», м. Вінниця, 12 квітня 2023 р. Вінниця: ТОВ «ТВОРИ», 2023. С. 56-61.

32. Відьмаченко А. П., Мозговий О. В., Стєклов О. Ф. Особливості пилових бур на Марсі. *Матеріали 11 Всеукраїнської НКО «Астрономія і сьогодення*», м. Вінниця, 12 квітня 2023 р. Вінниця: ТОВ «ТВОРИ», 2023. С. 87-92.

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

34. Vidmachenko A. P., Steklov A. F. How long ago has water flowed on Mars surface*? Results of modern scientific research and development, Proceedings of XI ISPCo*, Madrid, Spain (16-18.01.2022). Madrid: Barca Academy Publishing, 2022. P. 226-232.

UDC 523.43

# On the mechanisms of possible periodic redistribution of water ice between the polar caps of Mars

**Anatoliy Vidmachenko, Oleksandr Mozghovyi, Oleksii Steklov**

*Abstract.* At the beginning of the 21st century, the presence of a significant amount of water ice was confirmed in the Arctic Cap. A little later, the instruments of the "Mars Express" orbiter were also able to register considerable deposits of water ice around the South Pole. And a layer of "dry" ice with a thickness of 2 to 7 mm was found above the water ice. Total sediments in the South Polar Cap turned out to be

significantly smaller than in the North. Observations with the help of a gamma spectrometer made it possible to detect a large amount of hydrogen contained under the surface of Mars at significant distances from the polar caps, and even at the planet's equator. This hydrogen is part of water ice, which in such places is protected from sublimation by a soil made of insulating rock, dust, and rock fragments. During summer dust storms, significant amounts of dust are raised as a result of the rapid seasonal movement of carbon dioxide and water vapor; after a certain time, this dust settles from the atmosphere. This leads to a seasonal accumulation of dust in layered deposits in both polar and subpolar regions. When the seasons change on the planet, as a result of the significant eccentricity of the orbit of Mars, there is a significant asymmetry in the changes in the inflow of solar energy to the opposite hemispheres. The differences between aphelion and perihelion reach 40%. For this reason, when the planet is in aphelion, the summer in the Northern Hemisphere is longer and colder than in the Southern. Due to such a difference in seasonal characteristics between the southern and northern hemispheres, a kind of seasonal "pump" in a relatively short period of time can completely transfer water to the polar cap in the hemisphere in which summer falls on passing through the aphelion of the orbit. Modeling of present-day climate processes on Mars indicates that water ice deposits should be cyclically redistributed between the south and north polar regions of Mars for about 21,000 years. The rotation axis of Mars in Milankovitch cycles could change its inclination many times. The period of such changes is close to 105 years. Therefore, the asymmetry described in the paper is young, which may lead to a change in sign. Therefore, it is quite possible that during the history of Mars, the polar caps have repeatedly changed places.

*Keywords:* Mars, water ice, polar caps, seasons, climate changes.

## References

1. Becerra, P., Sori, M. M., Thomas, N., et al. (2019). *Timescales of the climate record in the south polar ice cap of Mars*. Geoph. Res. Letters, **46** (13), 7268-7277.

2. Conway, S. J., Hovius, N., Barnie, T., et al. (2012). *Climate-driven deposition of water ice and the formation of mounds in craters in Mars' north polar region*. Icarus, **220** (1), 174-193.

3. Dlugach, J. M., Morozhenko, A. V., Vid'Machenko, A. P., Yanovitskij, E. G. (1983). *Investigations of the optical properties of Saturn's atmosphere carried out at the main astronomical observatory of the Ukrainian Academy of Sciences*. Icarus, **54** (May), 319-336.

4. Howard, A. (2000). *The role of eolian processes in forming surface features of the Martian polar layered deposits*. Icarus, **144**, 267-288.

5. Morozhenko, A. V., Vid'machenko, A. P. (2004). *Polarimetry and Physics of Solar System Bodies*, Proceedings of the NATO Advanced Study Institute (20 September - 4 October, 2003), Yalta, Ukraine, 369-384. [in Ukrainian]. https://doi.org/10.1007/1-4020-2368-5_16

6. Morozhenko, A.V., Vid'machenko, A.P. (2005). *Polarimetry and Physics of Solar System Bodies. Photopolarimetry in Remote Sensing*, NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry. **161**, 369-384.

7. Morozhenko, A., Vidmachenko, A., Kostogryz, N. (2012). *Polarimetry and Physics of Solar System Bodies. Proceedings of the International Astronomical Union 10* (H16), 182-182.

8. 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 (3-15 June, 2017), Houston, Texas, LPI Contribution, 1966, id.6010.

9. Morozhenko, A. V., Vid'machenko, A. P. (2020). *Dust can affect on the mastering of Mars*. 22 International scientific conference "Astronomical School of Young Scientists" (December 11-12, 2020), Kyiv, Ukraine, 71-73. [in Ukrainian]

10. Morozhenko, A. V., Vidmachenko, A. P., Kostogryz, N. M. (2015). *Spectrophotometric properties of Moon's and Mars's surfaces exploration by shadow mechanism*. Highlights of Astronomy. **16**, 182-182.

11. Steklov, A. F., Vidmachenko, A. P., Miniailo, N. F. (1983). *Seasonal variations in the atmosphere of Saturn*. Soviet Astronomy Letters, **9** (Mar.-Apr.), 135-136. [in Russian]

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*, 36 Annual Lunar and Planetary Science Conference (March 14-18, 2005), League City, Texas, #1015.

13. Vidmachenko, A. P. (1987). *Manifestation of seasonal variations in the atmosphere of Saturn*. Kinematics and Physics of Celestial Bodies, **3** (6), 9-12. [in Russian]

14. Vidmachenko, A. P. (1994). *Variations in the brightness of celestial objects in astronomical observations mount Maidanak*. Kinematics and Physics of Celestial Bodies, **10** (5), 52-56. [in Russian]

15. Vidmachenko, A. P. (2009). *Planetary atmospheres*. Astronomical School's Report, **6** (1), 56-68.

16. Vidmachenko, A. P. (2009). *Research of the Mars by space vehicles*. Astronomical School's Report. **6** (1-2), 131-137.

17. Vidmachenko, A. P. (2009). *Water on Mars*. Astron. Almanac, **56**, 225-249.

18. Vid'machenko, A. P. (2014). *Study of Earth-like planets*. 16 International scientific conference "Astronomical School of Young Scientists" (May 29-31, 2015), Kirovograd, Ukraine, 12-13. [in Ukrainian]

19. Vidmachenko, A. P. (2018). *Comparative features of volcanoes on Solar system bodies*. 20 International scientific conference "Astronomical School of Young Scientists" (May 23-24, 2018), Uman, Ukraine, 9-12. [in Ukrainian]

20. 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, 5-7. [in Ukrainian]

21. Vidmachenko, A. P. (2018). *Water in Solar system.* 20 International scientific conference "Astronomical School of Young Scientists" (May 23-24, 2018), Uman, Ukraine, 91-93. [in Ukrainian]

22. Vidmachenko, A. P. (2023). *Comparison of features of impact and volcanic craters on the surface of Mars*. Proceed. of VIII Intern. Sc. and Pract. Conf. Progr. Res. m. w. (27-29.04.2023), Ch. 43. BoScience Publisher, Boston, USA, 237-246.

23. Vidmachenko, A. P. (2023). *Coordinates and names of surface details on Mars*. Proceedings of VII ISPCo "Science and technology: problems, prospects and innovations" (April 13-15, 2023), **39**, CPNPublishing Group, Osaka, Japan, 217-226.

24. Vidmachenko, A. P. (2023). *History of possible climate change on Mars*. Proceedings of VII ISPPCo "Science and innovation of modern world" (23-25 March 2023), Chapter 54, Cognum Publishing House, London, United Kingdom, 336-345.

25. Vidmachenko, A. P. (2023). *Macrorelief of the surface of Mars*. Proceedings of XIV ISPCo. Prospects for the development of science and the environment (April 10-12, 2023), Ch. 7, Helsinki, Finland, 34-39.

26. Vidmachenko, A. P. (2023). *The atmosphere of Mars*. Proceedings of VI ISPCo. "Scientific research in the modern world" (April 6-8, 2023), Chapter 45, Perfect Publishing, Toronto, Canada, 283-293.

27. Vidmachenko, A. P. (2023). *Thermal properties of the surface of Mars*. Proceedings of VII International Scientific and Practical Conference "Progressive research in the modern world" (March 29-31, 2023). Chapter 42. BoScience Publisher, Boston, USA, 243-252.

28. Vidmachenko, A. P., Dlugach, Z. M., Morozhenko, A. V. (1984). *Nature of the optical nonuniformity in Saturn's disk*. Solar System Research, **17** (4), 164-171.

29. 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), 157-159.

30. Vid'machenko, A. P., Mozghovyi, O. V., Steklov, O. F. (2023). *Features of the relief on the surface of Mars*. Proceedings of 11 All-Ukrainian Scientific Conference "Astronomy and present day" (April 12, 2023), Vinnytsia, Ukraine. LLC "TVORY", 66-71. [in Ukrainian]

31. Vid'machenko, A. P., Mozghovyi, O. V., Steklov, O. F. (2023). *Historical aspects of climate changes on Mars*. Proceedings of 11 All-Ukrainian Scientific Conference "Astronomy and present day" (April 12, 2023), Vinnytsia, Ukraine. LLC "TVORY", 56-61. [in Ukrainian]

32. Vid'machenko, A. P., Mozghovyi, O. V., Steklov, O. F. (2023). *Peculiarities of dust storms on Mars*. Proceedings of 11 All-Ukrainian Scientific Conference "Astronomy and present day" (April 12, 2023), Vinnytsia, Ukraine. LLC "TVORY", 56-61. [in Ukrainian]

33. Vid'machenko, 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, 89-92. [in Ukrainian]

34. 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 (16-18.01.2022), Madrid, Spain, Barca Academy Publishing, 226-232.

## Про авторів / About the authors

**Анатолій Відьмаченко,** доктор фізико-математичних наук, професор, академік АН ВШ України, професор кафедри фізики Національного університету біоресурсів і природокористування України, головний науковий співробітник відділу фізики субзоряних і планетних систем Головної астрономічної обсерваторії НАН України, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна;

**Anatoliy Vidmachenko,** Doctor of Science in Physics and Mathematics, Professor, Academician of the Academy of Sciences of the Higher School of Ukraine, Professor of the Department of Physics of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Chief Researcher of the Department of Physics of Substellar and Planetary Systems

of the Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, 15 Defense Heroes Str., Kyiv 03041, Ukraine;

**Олександр Мозговий,** кандидат технічних наук, доцент, кафедра фізики і методики навчання фізики, астрономії, Вінницький державний педагогічний університет імені Михайла Коцюбинського, вул. Острозького, 32, м. Вінниця, 21001, Україна;

**Oleksandr Mozghovyi,** Candidate of Technical Science, Associate Professor, Department of Physics and Teaching Methods of Physics, Astronomy, Vinnytsia Mykhailo Kotsiubynskyi State Pedagogical University, 32 Ostrozkyi Str., Vinnytsia 21001, Ukraine;

**Олексій Стєклов,** кандидат фізико-математичних наук, доцент, старший науковий співробітник відділу фізики субзоряних і планетних систем Головної астрономічної обсерваторії НАН України, вул. Академіка Заболотного, 27, м. Київ, 02000, Україна;

**Oleksiy Steklov,** Candidate of Science in Physics and Mathematics, Associate Professor, Senior Researcher of the Department of Physics of Substellar and Planetary Systems of the Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, 27 Academician Zabolotniy Str., Kyiv 02000, Ukraine.

Отримано / Received 12.07.2024
Доопрацьовано / Revised 15.08.2024