

УДК 523.482

Про внутрішню будову карликової планети Плутон

Анатолій Відьмаченко¹, Олександр Мозговий², Юлія Божок³

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 Національний транспортний університет, кафедра інформаційно-аналітичної діяльності та інформаційної безпеки, м. Київ, Україна
mavimfto@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-0797-8779>

³ Національний транспортний університет, кафедра інформаційно-аналітичної діяльності та інформаційної безпеки, м. Київ, Україна
bozhok2008@bigmir.net
<https://orcid.org/0009-0009-8956-2539>

Анотація. Температура на поверхні Плутона змінюється від 33 К до майже 60 К. Своїми розмірами й масою Плутон є значно меншим від усіх великих планет у Сонячній системі та ще й від семи супутників навколо цих планетних тіл. Хоча ця відносна карликова планета у 2.5 рази більша та майже у 14 разів масивніша від найбільшого тіла у Головному поясі астероїдів – іншої карликової планети – Церери. Доволі точне значення діаметра Плутона у 2376 ± 32 км вдалося отримати у 2015 році, ґрунтуючись на даних, отриманих апаратурою космічного апарата «New Horizons». Але про будову надр Плутона відомо все ще дуже мало. Певні висновки щодо їхнього складу зроблено із значення середньої густини карликової планети, яке становить 1.86 ± 0.01 г/см³. Тому можна вважати, що внутрішня структура Плутона повинна бути диференційованою, й на близько 65% складатися з каменю та льоду; здебільшого це повинен бути азотний та водяний лід. Ядро у Плутона повинне бути щільним і складатися із скелястого матеріалу. Діаметр цього ядра повинне бути близьким до 1700 км. Його може оточувати льодяна мантія товщиною від 100 до понад 200 км. На початку свого утворення, під дією розпаду радіоактивних елементів у ядрі, льоди могли розтанути. І в ті часи між мантією і скелястим ядром Плутона міг утворитися океан з рідкої води. Джерелами тепла могла бути акреція речовини на початку його утворення, розпад радіоактивних елементів та припливні деформації з боку його супутника Харона. Припускають, що на початку свого існування Плутон міг зіткнутися з деяким тілом порівняних розмірів. Це могло привести до утворення навколо Плутона існуючої системи супутників. Недавно припустили, що гори Піккар Монс та Райт Монс можуть бути злиттям багатьох сучасних кріовулканів. Це може вказувати на сучасне досить потужне джерело тепла на Плутоні.

Ключові слова: Плутон, карликова планета, водяний лід, внутрішня будова, припливні деформації.

1. Вступ

Своїми розмірами й масою Плутон поступається не тільки так званим великим планетам у Сонячній системі, а ще й деяким із їх супутників (рис. 1). Він виявився меншим від семи супутників планет: Каллісто, Титана, Іо, Ганімеда, Тритона, Європи та Місяця.

Наприклад, маса Плутона є меншою від маси Місяця майже у шість разів; його діаметр становить тільки $\frac{2}{3}$ від діаметра природного супутника Землі. Але він аж у 2,5 рази є більшим і в 14 разів масивнішим від іншої карликової планети – Церери, яка є найбільшим космічним тілом у Головному поясі астероїдів. У той же час, серед відомих транснептунових об'єктів карликова планета Плутон має найбільший діаметр. Хоча за своєю масою він майже на четверть поступається іншій карликовій планеті – Еріді, котра розташовується в так званому розсіяному диску [13]. Більш-менш точне значення діаметра Плутона у 2376 ± 32 км вдалося отримати тільки у 2015 році, ґрунтуючись на спостережних результатах, які отримані апаратурою з космічного апарата «New Horizons» [12, 16]. Сплюснутість поверхні Плутона виявилась меншою 1% [16].

2. Постановка проблеми

Але про будову надр цієї карликової планети відомо все ще дуже мало. Певні висновки щодо приблизного її складу можна зробити виходячи зі значення середньої густини; вона становить 1.86 ± 0.01 г/см³ [16]. Тому можна вважати, що Плутон має складатися із каменю та льоду. А виходячи із значної поширеності у Сонячній системі води, то лід там здебільшого має бути водяний. Доля кам'яної частини може становити майже 65 %.

Мета статті: описати внутрішню будову карликової планети Плутон на основі аналізу останніх даних про неї.

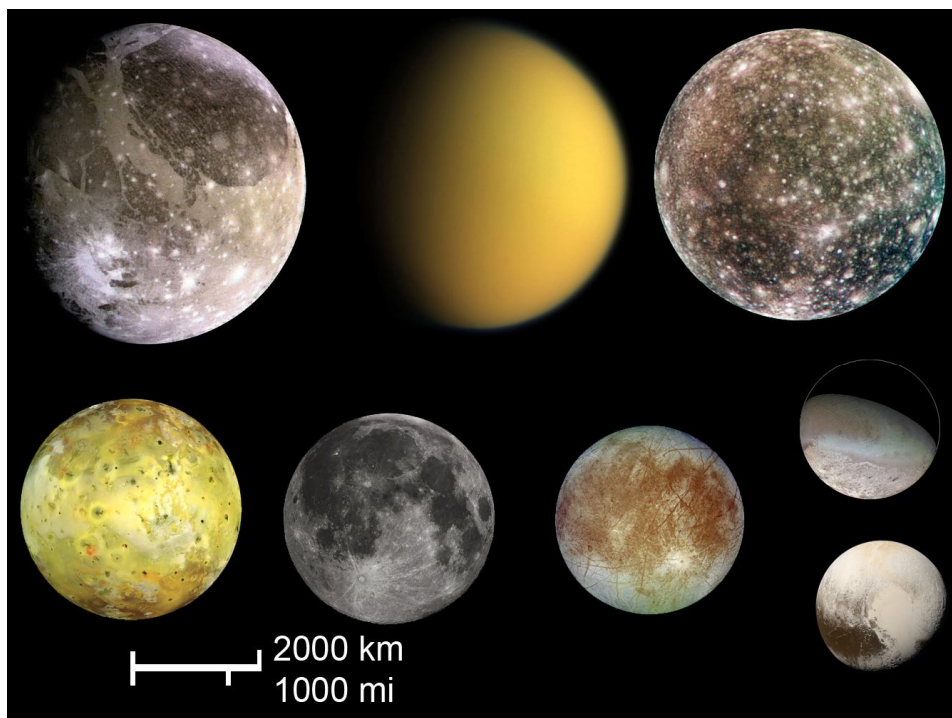


Рис. 1. Плутон (внизу, праворуч) порівняно із найбільшими супутниками у Сонячній системі (зліва направо та зверху вниз): Ганімед, Титан, Каллісто, Іо, Місяць, Європа та Тритон (https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/23/Pluto_compared2.jpg)

3. Основні результати

Більшість супутників навколо великих планет та більших астероїдних тіл мають диференційовану внутрішню структуру (рис. 2). Карликова планета Плутон, можна вважати, повинна мати подібну до них внутрішню структуру. Тобто, Плутон повинен мати досить щільне ядро, яке, скоріше всього, складається зі скельного матеріалу. Таке ядро має бути оточеним льодяною мантією. Дуже імовірно, що значення діаметра ядра повинне становити близько до двох третин від діаметра самого Плутона. Тобто, розмір ядра має становити близько до 1700 км. На межі мантії та ядра може розташовуватися льодовий прошарок із товщиною в межах від сотні до понад двох сотень кілометрів.

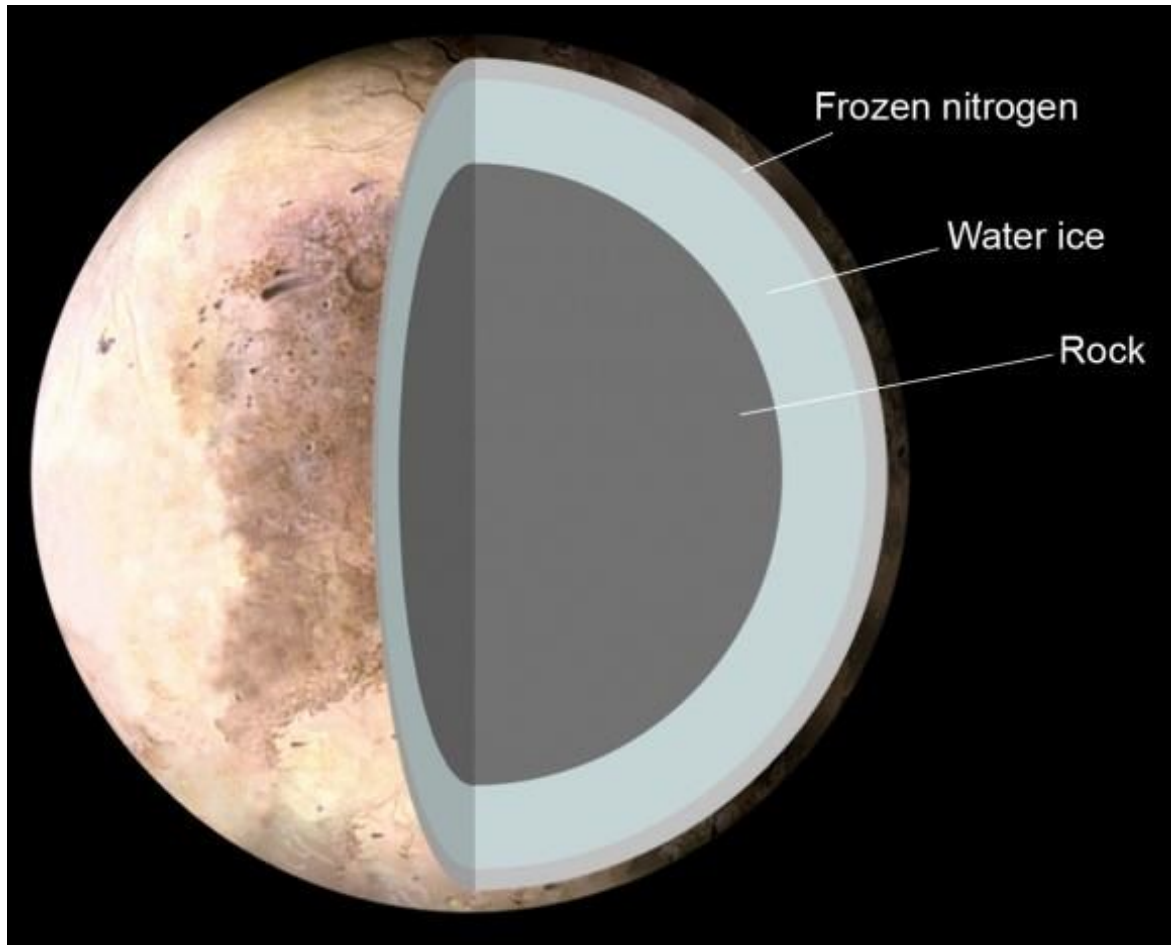


Рис. 2. Можлива внутрішня структура Плутона (https://www.universetoday.com/wp-content/uploads/2008/05/Internal_Structure_of_Pluto.jpg)

За деяких умов, на початку свого утворення, при розпаді поблизу центральної частини ядра радіоактивних елементів, мантіїний лід міг навіть розтопитися, так що скельні породи мали б відокремитися від нього у його центральній частині. При таких умовах цілком можливо, що між скелястим ядром Плутона та мантією у ті далекі часи міг навіть утворитись величезний океан із розтолої води. Й у випадку якщо б така модель для теплових змін внутрішнього стану Плутона була б правдоподібною, то така послідовність подій могла б певним чином відобразитись і на особливостях змін на видимому поверхневому шарі даного небесного тіла. Наприклад, наявність океану з рідкої води під верхньою частиною мантії могла була б викликати деякі зміни

температурного градієнта у мантиї й привести до відчутних змін напруги у шарі близькому до поверхні.

В свою чергу, такі ефекти мали б викликати добре видимі розриви та здавлювання на окремих частинах видимого рельєфу. Це могло б в ті далекі часи призвести до виникнення на поверхні Плутона розломів, які мали б вкрити усю кулю планетного тіла. А після таких подій на поверхні Плутона могли б появитись і водний лід, замерзлий азот та силікати.

Виходячи із вищесказаного, Плутон колись міг мати деякі джерела тепла. Серед них можна вказати на акрецію речовини на початку його утворення, на розпад радіоактивних елементів (котрий певною мірою може тривати й у даний момент), а також деякі періодичні припливні деформації, викликані його найбільшим супутником Хароном у ті далекі часи, коли вони ще не були одним боком повернуті один до одного.

Також припускають, що на початку свого існування Плутон міг зіткнутися з іншим тілом порівняних розмірів. Саме тоді таке зіткнення могло призвести до утворення навколо нього існуючої в даний час системи супутників. У ті далекі часи таке зіткнення також могло здійснити помітний внесок до нагріву надр карликової планети.

Скоріше всього, отриманого тепла цілком могло вистачити не тільки на плавлення льодів, але й на їх відокремлення від потужного кам'яного ядра [1]. Такі глобальні зміни могли призвести до диференціації надр Плутона, унаслідок чого його кам'янисте ядро змогло стати оточеним мантиєю із криги товщиною у декілька сотень кілометрів. Відповідно до проведених модельних розрахунків, отриманого при цьому тепла мало навіть вистачити на утворення під поверхнею океану з рідкої води, саме так, як це зараз має місце в надрах деяких із супутників навколо планет-гігантів [11, 19].

Отримані на сьогодні спектральні результати спостережень вказують на те, що у деяких місцях лід із води зараз виходить на поверхню Плутона. Проте, дуже часто, він може бути замаскованим тонким покривом із інших легких льодів [4]; майже на 98% цим льодом є азотний лід.

Окрім згаданих речовин, на поверхні Плутона вдалося виявити замерзлий метан (згідно отриманих оцінок, його може бути від 0.4 % [8] до 3% [18]) і оксид вуглецю (0.01-0.2% [8]); також знайдено домішки деяких складніших сполук, які утворюються з метану й азоту під дією жорстких складових сонячного випромінювання. До них відносяться, наприклад, етан [7], деякі більш важкі нітрильні та вуглеводневі сполуки [3], а також такі високомолекулярні сполуки як толіни, які надають поверхні Плутона та деяких інших далеких від Сонця тіл коричневих відтінків [4]. Деякі із поширених на таких поверхнях замерзлих речовин часто зовсім не мають забарвлення. Тому вкриті такими речовинами ділянки поверхні Плутона є дуже світлими (рис. 3).

До таких речовин відносяться монооксид вуглецю, азот, меншою мірою – метан. Усі вони в умовах Плутона вирізняються значною леткістю, і тому здатні до сезонного переміщення його поверхнею. Також це суттєво впливає на забарвлення всієї поверхні [5].

Лід із води при температурах на поверхні Плутона має величезну міцність. І тому саме із водяного льоду утворюються деталі рельєфу з висотами у декілька кілометрів. А оскільки лід з води є ще й легким, то своєрідні айсбергові льодяні утворення, які «плавають» у помітно важчих, але більш текучих азотних льодах, також складаються із води [6].

Відмітимо, що метановий лід є ще легшим [9]. Проте, на відміну навіть від замерзлого оксиду вуглецю CO, метан дуже важко розчиняється в замерзлом азоті [3]. По цій причині подекуди, метан може існувати на поверхні Плутона в чистому вигляді [8].

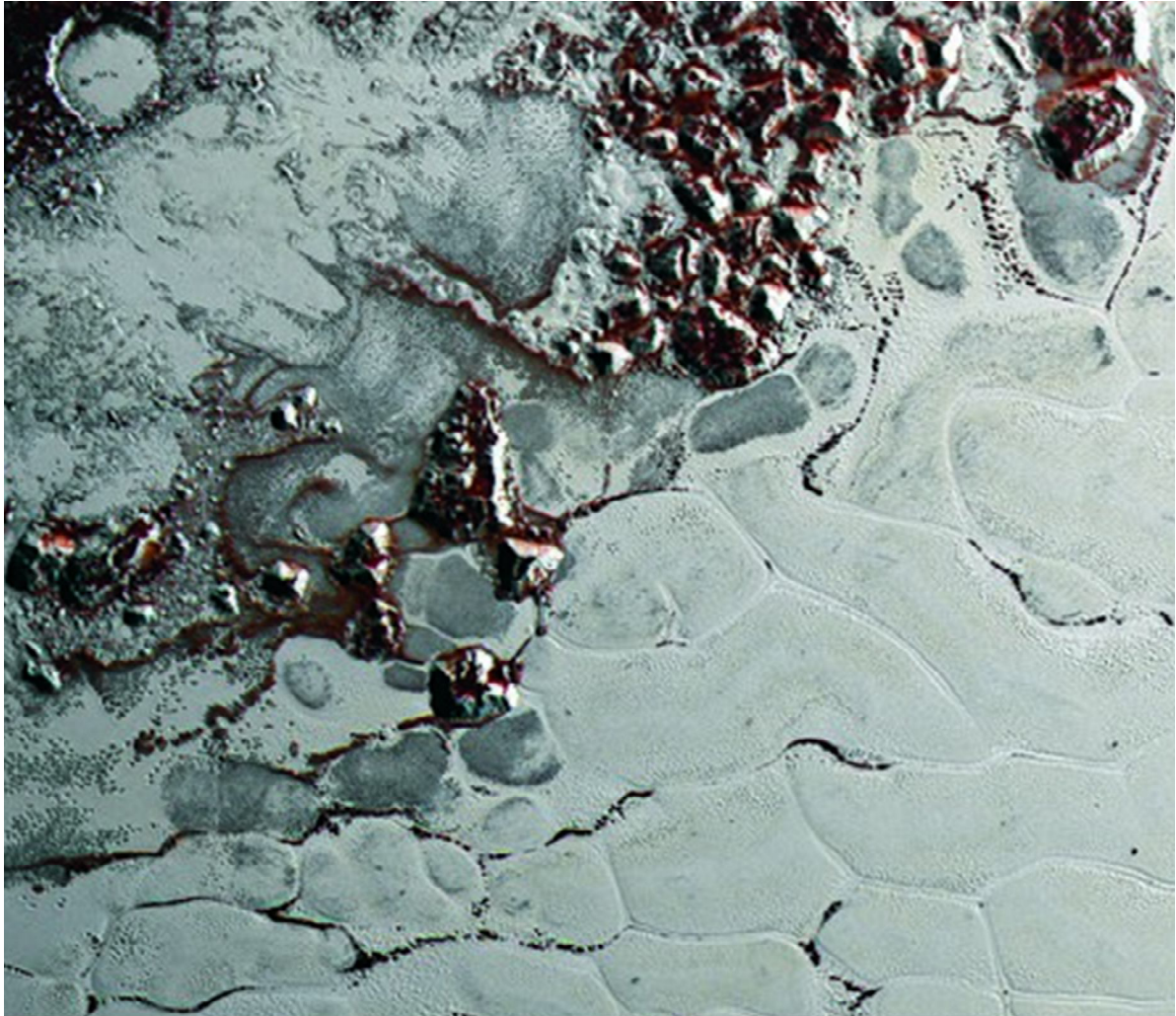


Рис. 3. Гори на краю рівнини Sputnik Planitia
(https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/23/Pluto%E2%80%99s_Heart_Like_a_Cosmic_Lava_Lamp.jpg)

Оскільки Плутон розташований майже в 40 разів далі від Сонця, ніж наша Земля, то притоки сонячної енергії на ньому слабкіші у 1600 разів. Значення температури на плутоновій поверхні є досить різним на різних ділянках: від менше 35 К до майже 60 К. При цьому, на місцевості темних кольорів спостерігаються більші значення температури, тоді як на яскравій – менші. Подібні відмінності являються наслідком відмінностей у характеристиках поглинання сонячного випромінювання, а також того, що яскраві поверхні є суттєво багатшими на замерзлі гази. До того ж, їх випаровування додатково охолоджуватиме цю ж частину поверхні.

У роботі [14] подано припущення, що гори Райт Монс і Піккар Монс насправді є злиттям багатьох менших сучасних кріовулканічних утворень (рис. 4). І це може свідчити про існування сучасного джерела тепла на Плутоні на рівнях, котрі ще зовсім недавно вважалися неможливими.

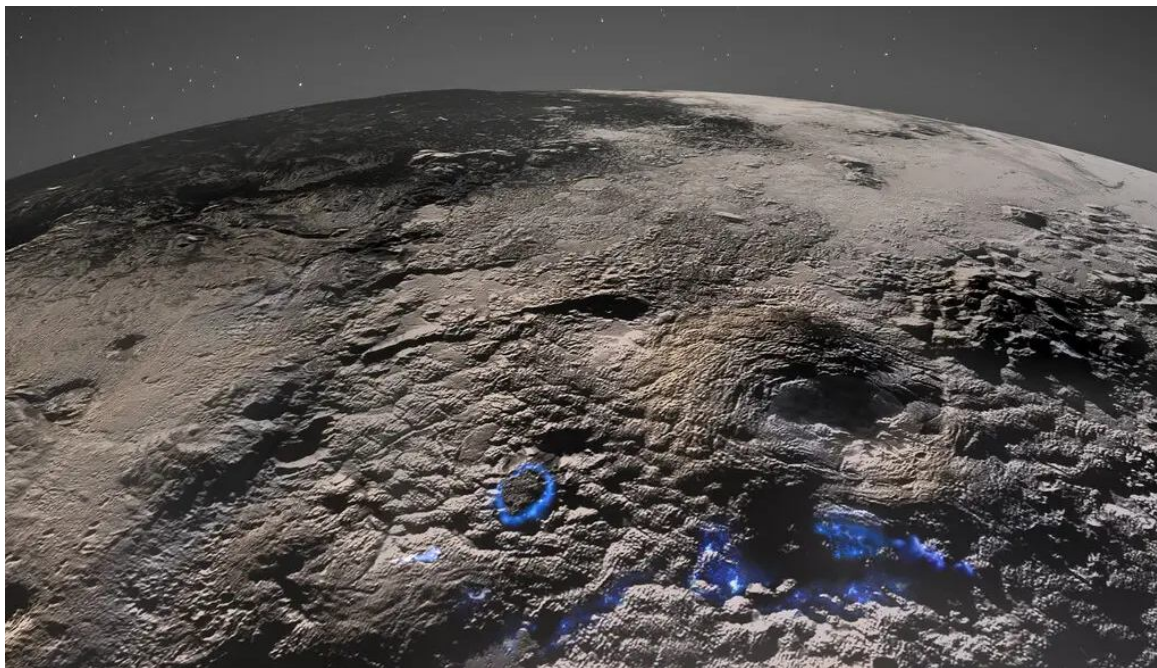


Рис. 4. На зображеннях Плутона, зроблених апаратурою космічного апарата «New Horizons», виявлено недавню активність крижаних вулканів (виділено синім кольором) (<https://static01.nyt.com/images/2022/03/29/science/29sci-pluto1/29sci-pluto1-jumbo.jpg?quality=75&auto=webp>)

Висновки. Отримані дані про карликову планету Плутон дозволяють припустити, що його внутрішня будова має бути диференційованою. Ядро має бути щільним і оточене льодяною мантією. Карликова планета отримує дуже мало сонячної енергії, але на зображення Плутона, які зроблені апаратурою космічного апарата «New Horizons», виявлено недавню активність крижаних вулканів, що може вказувати на сучасне досить потужне джерело тепла на Плутоні.

Конфлікт інтересів і етика. Автори заявляють, що не мають конфліктів інтересів. Автори також заявляють про повне дотримання всіх правил етики журнальних досліджень.

Подяки. Автори заявляють про відсутність спеціального фінансування цієї роботи.

Список використаних джерел

1. Barr A. C., Collins G. C. Tectonic activity on Pluto after the Charon-forming impact. *Icarus*. 2015. Vol. 246. P. 146–155. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.03.042>
2. Bierson C., Nimmo F., Stern S. A. Evidence for a hot start and early ocean formation on Pluto. *Nature Geoscience*. 2020. Vol. 769, № 7. P. 468–472. DOI: <https://www.nature.com/articles/s41561-020-0595-0>
3. Cruikshank D. P., Grundy W. M., DeMeo F. E. et al. The surface compositions of Pluto and Charon. *Icarus*. 2015. Vol. 246. P. 82–92. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.05.023>
4. Grundy W. M., Binzel R. P., Buratti B. J., et al. Surface compositions across Pluto and Charon. *Science*. 2016. Vol. 351 (6279). P. aad9189. DOI: <http://dx.doi.org/10.1126/science.aad9189>
5. Grundy W. M., Olkin C. B., Young L. A., et al. Near-infrared spectral monitoring of Pluto's ices: Spatial distribution and secular evolution. *Icarus*. 2013. Vol. 223, № 2. P. 710–721. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.01.019>
6. Hand E. Late harvest from Pluto reveals a complex world. *Science*. 2015. Vol. 350 (6258). P. 260–261. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.350.6258.260>

7. Holler B. J., Young L. A., Grundy W. M., et al. Evidence for longitudinal variability of ethane ice on the surface of Pluto. *Icarus*. 2014. Vol. 243. P. 104–110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.09.013>
8. Lellouch E., de Bergh C., Sicardy B., et al. Exploring the spatial, temporal, and vertical distribution of methane in Pluto's atmosphere. *Icarus*. 2015. Vol. 246. P. 268–278. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.03.027>
9. Moore J. M., McKinnon W. B., Spencer J. R., et al. The geology of Pluto and Charon through the eyes of New Horizons. *Science*. 2016. Vol. 351 (6279). P. 1284–1293. DOI: <http://dx.doi.org/10.1126/science.aad7055>
10. Morozhenko A.V., Ovsak A. S., Vid'machenko A. P., Teifel V. G., Lysenko P.G. Imaginary part of the refractive index of aerosol in latitudinal belts of Jupiter's disc. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2016. Vol. 32. P. 30–37. DOI: <http://dx.doi.org/10.3103/S0884591316010062>
11. Morozhenko A.V., Vid'machenko A. P. Polarimetry and Physics of Solar System Bodies Photopolarimetry in Remote Sensing. *Proceedings of the NATO Advanced Study Institute* (Yalta, Ukraine. 20 September - 4 October 2003). P. 369–384.
12. Nimmo F., Umurhan O., Lisse C. M., et al. Mean radius and shape of Pluto and Charon from New Horizons images. *Icarus*. 2017. Vol. 287. P. 12–29. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2016.06.027>
13. Sicardy B., Ortiz J. L., Assafin M., et al. Size, density, albedo and atmosphere limit of dwarf planet Eris from a stellar occultation. *European Planetary Science Congress Abstracts: journal*. 2011. P. 137.
14. Singer K. N. Large-scale cryovolcanic resurfacing on Pluto. *Nature Communications*. 2022. Vol. 13, № 1. P. 1542. DOI: <http://dx.doi.org/10.48550/arXiv.2207.06557>
15. Steklov A. F., Vidmachenko A. P., Miniailo N. F. Seasonal variations in the atmosphere of Saturn. *Soviet Astronomy Letters*. 1983. Vol. 9 (Mar.-Apr.). P. 135–136.
16. Stern S. A., Bagenal F., Ennico K., et al. The Pluto system: Initial results from its exploration by New Horizons. *Science*. 2015. Vol. 350 (6258). P. id.aad1815. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aad1815>
17. Stern S. A., Grundy W., McKinnon W. B., et al. The Pluto System After New Horizons. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. 2018. Vol. 56. P. 357–392. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1712.05669>
18. Tegler S. C., Cornelison D. M., Grundy W. M., et al. Methane and Nitrogen Abundances on Eris and Pluto. *Bulletin of the American Astronomical Society*. 2010. Vol. 42. P. 984. DOI: <https://10.1088/0004-637X/725/1/1296>
19. Vid'Machenko A. P. Giant planets – Theoretical and observational aspects. *Astronomicheskii Vestnik*. 1991. Vol. 25, № 3. P. 277–292.
20. Vidmachenko A. P. Seasonal variations in the optical characteristics of Saturn's atmosphere. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 1999. Vol. 15, № 5. P. 320–331.
21. Vidmachenko A. P. Sedna: the history of the discovery and its features. *Astronomical almanac*. 2005. Vol. 52. P. 201–212.
22. Vidmachenko A. P. Dwarf planets (to the 10th anniversary of the introduction of the new class of planets). *Astronomical almanac*. 2015. Vol. 62. P. 228–249.
23. Vidmachenko A. P. Features of surface topography and the geological activity of Pluto. *18 International scientific conference Astronomical School of Young Scientists* (National Aviation University, Kyiv, Ukraine, May, 26-27, 2016). P. 12–14.
24. Vidmachenko A. P. The floating ices on the surface of Pluto. *18 International scientific conference Astronomical School of Young Scientists* (National Aviation University, Kyiv, Ukraine, May 26-27 2016). P. 10–12.
25. Vidmachenko A. P. Modern volcanic activity on the Moon. *20 International scientific conference Astronomical School of Young Scientists* (May 23-24, 2018, Uman, Ukraine). P. 5–7.
26. Vidmachenko A. P. Pluto (to the 90th anniversary of the discovery of the planet). *Astronomical almanac*. 2019. Vol. 66. P. 217–229.
27. Vidmachenko A. P. Features of seasonal changes on Pluto. *Proceedings of the 8th International scientific and practical conference, Science, innovations and education: problems and prospects* (March 9-11, 2022, Tokyo, Japan). Chapter 17. P. 108–116.
28. Vidmachenko A. P. About discovering and getting of all new information about the now dwarf planet Pluto. *Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference «Modern science: fundamental and applied aspects»* (December 30-31, 2024, Beijing, China). P. 20–26.
29. Vidmachenko A. P. Features of Pluto's rotation around its axis and around the Sun. *Sciences of Europe*. 2025. Vol. 156. P. 24–28.
30. Vidmachenko A. P. Physical parameters of Pluto according to the results of remote observations and the earliest data from the flyby trajectory. *Proceedings of the 6th International scientific and practical conference «Scientific achievements of contemporary society»* (January 10-12, 2025, London, United Kingdom). Chapter 60. P. 312–320.

31. Vidmachenko A. P. The chemical composition of Pluto's atmosphere. *The Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference «Modern problems of science and technology»* (January 20-22, 2025, Tallinn, Estonia). Section: Physical and mathematical sciences. P. 62–68.
32. Vidmachenko A. P. The earliest data on the general characteristics of Pluto's topography. *Proceedings of the 5th International scientific and practical conference "Science in the modern world: innovations and challenges"* (January 23-25, 2025, Toronto, Canada). Chapter 35. P. 202–211.
33. Vidmachenko A. P., Steklov A. F. Features of volcanic structures on Venus. *Proceedings of the 9th International scientific and practical conference "Modern directions of scientific research development"*, 2022. P. 195–204.
34. Vidmachenko A. P., Vidmachenko H. A. Is it dangerous asteroids? *Astronomical almanac*. 2007. Vol. 53. P. 195–207.

UDC 523.482

On the internal structure of the dwarf planet Pluto

Anatoliy Vidmachenko, Oleksandr Mozghovyi, Yuliia Bozhok

Abstract. The temperature on the surface of Pluto varies from 33 K to almost 60 K. In terms of size and mass, Pluto is much smaller than all the major planets in the Solar System and even the seven satellites around these planetary bodies. Although, this recent dwarf planet is 2.5 times larger and almost 14 times more massive than the largest body in the Main Asteroid Belt - another dwarf planet - Ceres. A fairly accurate value for the diameter of Pluto of 2376 ± 32 km was obtained in 2015, based on data obtained by the New Horizons spacecraft. But very little is still known about the structure of Pluto's interior. Certain conclusions about their composition are made from the value of the average density of the dwarf planet, which is 1.86 ± 0.01 g/cm³. Therefore, it can be assumed that the internal structure of Pluto should be differentiated, and about 65% consist of rock and ice; mostly it should be nitrogen and water ice. Pluto's core should be dense and consist of rocky material. The diameter of this core should be close to 1700 km. It can be surrounded by an icy mantle with a thickness of 100 to more than 200 km. At the beginning of its formation, under the influence of the decay of radioactive elements in the core, the ices could melt. And at that time, an ocean of liquid water could have formed between the mantle and the rocky core of Pluto. The sources of heat could be the accretion of matter at the beginning of its formation, the decay of radioactive elements and tidal deformations from its satellite Charon. It is assumed that at the beginning of its existence, Pluto could have collided with somebody of comparable size. This could have led to the formation of the existing satellite system around Pluto. Recently, it has been suggested that the Piccard Mons and Wright Mons mountains may be the merger of many modern cryovolcanoes. This may indicate a modern, fairly powerful heat source on Pluto.

Keywords: Pluto, dwarf planet, water ice, internal structure, tidal deformations.

References

1. Barr, A. C., Collins, G. C. (2015). *Tectonic activity on Pluto after the Charon-forming impact*, *Icarus*, **246**, 146–155. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.03.042>
2. Bierson, C., Nimmo, F., Stern, S. A. (2020). *Evidence for a hot start and early ocean formation on Pluto*, *Nature Geoscience*, **769** (7), 468–472. <https://www.nature.com/articles/s41561-020-0595-0>
3. Cruikshank, D. P., Grundy, W. M., DeMeo, F. E. et al. (2015). *The surface compositions of Pluto and Charon*, *Icarus*, **246**, 82–92. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.05.023>
4. Grundy, W. M., Binzel, R. P., Buratti, B. J., et al. (2016). *Surface compositions across Pluto and Charon*, *Science*, **351** (6279), aad9189. <http://dx.doi.org/10.1126/science.aad9189>
5. Grundy, W. M., Olkin, C. B., Young, L. A., et al. (2013). *Near-infrared spectral monitoring of Pluto's ices: Spatial distribution and secular evolution*, *Icarus*, **223** (2), 710–721. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.01.019>
6. Hand, E. (2015). *Late harvest from Pluto reveals a complex world*, *Science*, **350** (6258), 260–261. <https://doi.org/10.1126/science.350.6258.260>
7. Holler, B. J., Young, L. A., Grundy, W. M., et al. (2014). *Evidence for longitudinal variability of ethane ice on the surface of Pluto*, *Icarus*, **243**, 104–110. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.09.013>
8. Lellouch, E., de Bergh, C., Sicardy, B., et al. (2015). *Exploring the spatial, temporal, and vertical distribution of methane in Pluto's atmosphere*, *Icarus*, **246**, 268–278. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.03.027>

9. Moore, J. M., McKinnon, W. B., Spencer, J. R., et al. (2016). *The geology of Pluto and Charon through the eyes of New Horizons*. *Science*, **351** (6279), 1284–1293. <http://dx.doi.org/10.1126/science.aad7055>
10. Morozhenko, A.V., Ovsak, A. S., Vid'machenko, A. P., Teifel, V. G., Lysenko, P.G. (2016). *Imaginary part of the refractive index of aerosol in latitudinal belts of Jupiter's disc*, *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, **32**, 30–37. <http://dx.doi.org/10.3103/S0884591316010062>
11. Morozhenko, A.V., Vid'machenko, A. P. (2003). *Polarimetry and Physics of Solar System Bodies Photopolarimetry in Remote Sensing*, Proceedings of the NATO Advanced Study Institute (Yalta, Ukraine. 20 September - 4 October 2003), 369–384.
12. Nimmo, F., Umurhan, O., Lisse, C. M., et al. (2017). *Mean radius and shape of Pluto and Charon from New Horizons images*, *Icarus*, **287**, 12–29. <http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2016.06.027>
13. Sicardy, B., Ortiz, J. L., Assafin, M., et al. (2011). *Size, density, albedo and atmosphere limit of dwarf planet Eris from a stellar occultation*, *European Planetary Science Congress Abstracts: journal*, 137.
14. Singer, K. N. (2022). *Large-scale cryovolcanic resurfacing on Pluto*, *Nature Communications*, **13** (1), 1542. <http://dx.doi.org/10.48550/arXiv.2207.06557>
15. Steklov, A. F., Vidmachenko, A. P., Miniailo, N. F. (1983). *Seasonal variations in the atmosphere of Saturn*, *Soviet Astronomy Letters*, **9** (Mar.-Apr. 1983), 135–136.
16. Stern, S. A., Bagenal, F., Ennico, K., et al. (2015). *The Pluto system: Initial results from its exploration by New Horizons*, *Science*, **350** (6258), id.aad1815. <https://doi.org/10.1126/science.aad1815>
17. Stern, S. A., Grundy, W., McKinnon, W. B., et al. (2018). *The Pluto System After New Horizons*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, **56**, 357–392. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1712.05669>
18. Tegler, S. C., Cornelison, D. M., Grundy, W. M., et al. (2010). *Methane and Nitrogen Abundances on Eris and Pluto*, *Bulletin of the American Astronomical Society*, **42**, 984. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/725/1/1296>
19. Vid'Machenko, A. P. (1991). *Giant planets – Theoretical and observational aspects*, *Astronomicheskii Vestnik*, **25** (3), 277–292.
20. Vidmachenko, A. P. (1999). *Seasonal variations in the optical characteristics of Saturn's atmosphere*, *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, **15** (5), 320–331.
21. Vidmachenko, A. P. (2005). *Sedna: the history of the discovery and its features*, *Astronomical almanac*, **52**, 201–212.
22. Vidmachenko, A. P. (2015). *Dwarf planets (to the 10th anniversary of the introduction of the new class of planets)*, *Astronomical almanac*, **62**, 228–249.
23. Vidmachenko, A. P. (2016). *Features of surface topography and the geological activity of Pluto*, 18 International scientific conference Astronomical School of Young Scientists (National Aviation University, Kyiv, Ukraine, May, 26-27, 2016), 12–14.
24. Vidmachenko, A. P. (2016). *The floating ices on the surface of Pluto*, 18 International scientific conference Astronomical School of Young Scientists (National Aviation University, Kyiv, Ukraine, May 26-27 2016), 10–12.
25. 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.
26. Vidmachenko, A. P. (2019). *Pluto (to the 90th anniversary of the discovery of the planet)*, *Astronomical almanac*, **66**, 217–229.
27. Vidmachenko, A. P. (2022). *Features of seasonal changes on Pluto*, Proceedings of the 8th International scientific and practical conference, Science, innovations and education: problems and prospects (March 9-11, 2022, Tokyo, Japan), Chapter 17, 108–116.
28. Vidmachenko, A. P. (2024). *About discovering and getting of all new information about the now dwarf planet Pluto*, Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference «Modern science: fundamental and applied aspects» (December 30-31, 2024, Beijing, China), 20–26.
29. Vidmachenko, A. P. (2025). *Features of Pluto's rotation around its axis and around the Sun*, *Sciences of Europe*, **156**, 24–28.
30. Vidmachenko, A. P. (2025). *Physical parameters of Pluto according to the results of remote observations and the earliest data from the flyby trajectory*, Proceedings of the 6th International scientific and practical conference “Scientific achievements of contemporary society” (January 10-12, 2025, London, United Kingdom), Chapter 60, 312–320.
31. Vidmachenko, A. P. (2025). *The chemical composition of Pluto's atmosphere*, The Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference «Modern problems of science and technology» (January 20-22, 2025, Tallinn, Estonia), Section: Physical and mathematical sciences, 62–68.
32. Vidmachenko, A. P. (2025). *The earliest data on the general characteristics of Pluto's topography*, Proceedings of the 5th International scientific and practical conference “Science in the modern world: innovations and challenges” (January 23-25, 2025, Toronto, Canada), Chapter 35, 202–211.

33. Vidmachenko, A. P., Steklov, A. F. (2022). *Features of volcanic structures on Venus*, Proceedings of the 9th International scientific and practical conference “Modern directions of scientific research development”, 195–204.
34. Vidmachenko, A. P., Vidmachenko, H. A. (2007). *Is it dangerous asteroids?*, Astronomical almanac, **53**, 195–207.

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 Heroiv Oborony Str., Kyiv, 03041, Ukraine;

Олександр Мозговий, кандидат технічних наук, доцент, кафедра інформаційно-аналітичної діяльності та інформаційної безпеки, Національний транспортний університет, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, 01010, Україна;

Oleksandr Mozghovyi, Candidate of Science in Engineering, Associate Professor, Department of Information and Analytical Activities and Information Security, National Transport University, 1, Mykhaila Omelianovycha – Pavlenka Str. Kyiv 01010, Ukraine;

Юлія Божок, доцент кафедри транспортного права та логістики, Національний транспортний університет, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, 01010, Україна;

Yuliia Bozhok, Associate Professor, Department of Transport Law and Logistics, National Transport University, 1, Mykhaila Omelianovycha – Pavlenka Str. Kyiv 01010, Ukraine.

Отримано / Received 02.04.2025

Прийнято до друку / Accepted 21.04.2025

Опубліковано / Published 21.05.2025