

УДК 523.482

Особливості фізичних характеристик атмосфери Плутона за результатами спостережень і модельних оцінок

Анатолій Відьмаченко¹, Олександр Мозговий²

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>

Анотація. Згідно до модельних оцінок температура біля поверхні Плутона змінюється від 33 К до майже 60 К через витягнутість його орбіти. За таких умов замерзає азот, окис вуглецю, вода й метан. Основною складовою на поверхні карликової планети є азотний лід. Біля точки перигелію внаслідок нагрівання він із твердого стану переходить до газоподібного, збільшуючи атмосферний тиск. Проте атмосфера Плутона є дуже розрідженою і складається із азоту з домішками метану й чадного газу. Під дією сонячного ультрафіолетового випромінювання з цих сполук утворюються складніші сполуки: етан, ацетилен, етилен тощо. При переході до афелію ці сполуки випадають на поверхню Плутона. Апаратурою космічного зонда «New Horizons» в атмосфері Плутона було виявлено шаруватий серпанок блакитного кольору, який охоплював всю карликову планету до висоти близько 300 км. Цей серпанок над північними полярними областями виявився був майже у 3 рази щільнішим, ніж над поверхнею в екваторіальній області. Найімовірніше, він може бути утвореним із частинок, які синтезувалися із атмосферних газів під дією жорсткого сонячного випромінювання.

Ключові слова: Плутон, атмосфера, атмосферні складові, серпанок, моделювання.

1. Вступ

Модельні оцінки показують, що температура біля поверхні Плутона на відстанях від Сонця, які змінюються від 29.66 а. о. у перигелії до 48.87 а. о. в афелії, може змінюватися від 33 К до майже 60 К. За таких умов замерзає не лише вода, але й інші рідини та гази, які знайдені на поверхні цієї карликової планети [15, 22]. Наприклад, там

знайдено азот, окис вуглецю [7] і метан. Усі ці сполуки починають замерзати при значно нижчих температурах, ніж вода. Температурні умови на поверхні Плутона значно змінюються через витягнутість його орбіти [27]. У найближчій до Сонця точці це приводить до нагріву поверхні цієї карликової планети настільки, що деякі із її складових можуть змінювати свій фазовий стан.

2. Постановка проблеми

Згідно багатьох спостережних даних, основною складовою поверхні Плутона являється азотний лід [21]. Завдяки фізико-хімічним властивостям, внаслідок нагрівання поверхневого шару поблизу точки перигелію азот із твердого стану має можливість переходити в газоподібний. У результаті сублімації азотного льоду його кількість навколо Плутона зростає, і це викликає збільшення тиску у переважно азотній атмосфері.

Через фізико-хімічні властивості даного хімічного елементу, на певних рівнях висоти в атмосфері Плутона зможуть утворюватись ще й шари аерозольних [10, 12] хмар. Але моделювання показує, що через невелику силу тяжіння у цієї карликової планети, її не достатньо для тривалого утримування цієї газово-аерозольної оболонки. Тому через деякий час новоутворені молекули втікають з атмосфери в оточуючий космічний простір. А в моменти часу, коли Плутон знаходиться від Сонця на великих відстанях, то атмосфера може настільки остигати, щоб її складові вимерзали, і практично повністю знову осідали на поверхню. Атмосферу навколо Плутона вдалося виявити після тривалих пошуків, тільки у 1985 році [25, 26] при спостереженнях покриття його диском зорі. Якщо б у цього об'єкта газова атмосфера була відсутньою, то потік світла від зорі зникав би досить різко. Проте при спостереженнях Плутона, зникнення світла відбувалося поступово (рис. 1). Остаточоно підтвердити існування навколо цього небесного тіла атмосфери вдалося у 1988 році при спостереженнях покриття зорі кількома групами спостерігачів [27].

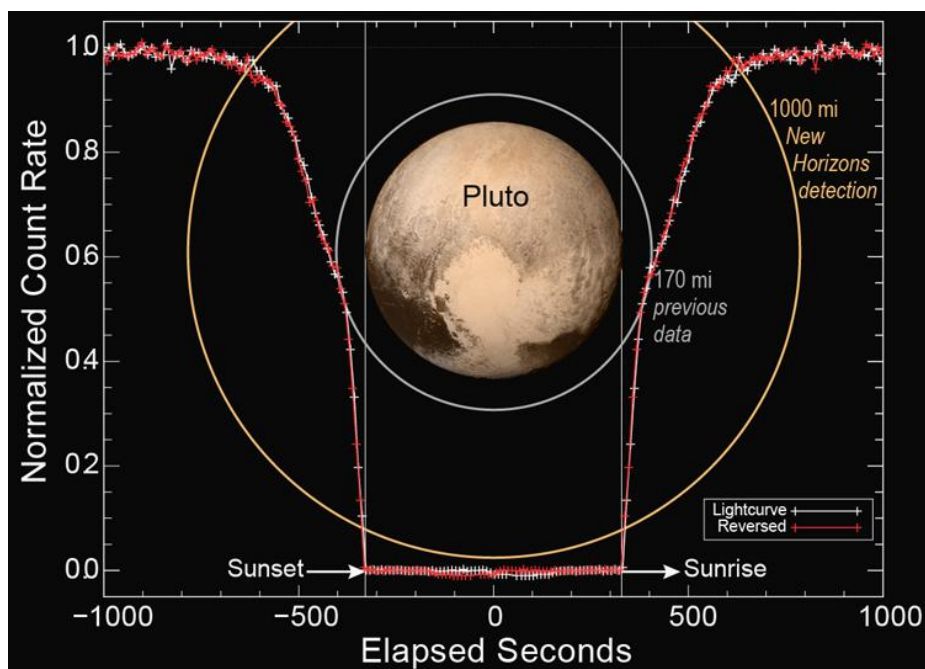


Рис. 1. Криві поглинання ультрафіолету від Сонця в атмосфері Плутона, які були виміряні у момент польоту космічного апарата «New Horizons» через тінь Плутона

(https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a3/PIA19716_Alice_Solar_Occultation_%28cropped%29.jpg).

Мета статті: описати особливості фізичних характеристик атмосфери Плутона на основі результатів різних досліджень та модельних оцінок карликової планети.

3. Основні результати

Характеристики атмосфери навколо Плутона було досліджено спектральними методами. Аналіз отриманих результатів спостережень показав, що атмосфера навколо Плутона виявилася досить розрідженою. Вона складається з газів, які випарувалися з льодів на поверхні карликової планети. Вдалося виявити, що основним компонентом поверхневого шару є азот; також знайшли у невеликій кількості домішки метану ($0.25 \div 0.40\%$) й чадного газу ($\approx 0.05 \div 0.10\%$). Під дією жорстких складових випромінювання Сонця із даних сполук могли утворюватись ще й ряд інших складніших сполук. Зокрема, до них відносять етан, ацетилен й етилен. Через деякий час при змінах фізичних умов біля поверхні Плутона, вищеназвані сполуки випадають своєрідним снігом на його поверхню.

Імовірно, що такі ж частинки мають утворювати ще й газово-аерозольні шари туману, які спостерігались на висотах дещо більших за 200 км над поверхнею. Незважаючи на те, що атмосфера Плутона являється досить розрідженою, та серпанковий туман був достатньо помітним. А завдяки розсіяному туманом сонячному світлу, змогли навіть отримати декілька зображень окремих деталей поверхні, розташованих на нічному боці Плутона.

Атмосферний тиск біля поверхні Плутона виявився дуже малим. Проте його значення помітно змінювалось із часом. Причому ці зміни часто відбувалися ще й досить неочікувано. Через витягнутість орбіти, в афелії Плутон отримує від Сонця майже у три рази менше тепла, ніж у перигелії. Моделювання показує, що такі зміни в освітленні мають приводити до значних змін в його атмосфері. Адже прогнози передбачають, що в афелії більша частина атмосфери Плутона у результаті охолодження має вимерзати і випадати снігом на поверхню. При цьому, атмосферний тиск мав би зменшитися в багато разів.

Але спостереження покриттів Плутоном зірок, які виконані з 1988 по 2015 роки показали, що атмосферний тиск поступово збільшився майже утричі. І це відбулося не дивлячись на те, що після 1989 року Плутон почав віддалятися від Сонця. Можливим поясненням таких змін в атмосфері може бути той факт, що починаючи від 1987 року північна навколополярна область Плутона вперше за 124 роки розпочала свій вихід з тіні на освітлення прямими сонячними променями; нагрівання поверхневих шарів карликової планети, викликане цим ефектом, могло сприяти сублімації азоту з навколополярної області.

У 2015 році вимірювання апаратурою космічного зонда «New Horizons» показали (рис. 2), що тиск в атмосфері біля поверхні становив близько 1 Па. Це значення практично узгоджувалось із результатами спостережень покриттів зір протягом декількох попередніх років. Крім того, атмосфера Плутона вирізнялася ще й помітними й не до кінця зрозумілими сезонними змінами [16, 17, 23, 24], які появляються внаслідок особливостей орбітального та осевого обертання цієї карликової планети.

Отримані апаратурою космічного зонда спостережні дані щодо покриттів зірок диском Плутона дозволили виміряти зміни температура в його атмосфері з часом при

сході і заході Сонця. Найбільшими зміни були у моменти, коли Сонце тільки що виходило із-за Плутонового диска. Саме в цей час молекулярний азот у верхній частині атмосфери Плутона починав поглинати сонячні промені; а в моменти, коли космічний зонд наближався до тіні від диска планети, світловий потік від Сонця суттєво зменшувався. У моменти, коли ефекти від явища затемнення збільшувалися, сонячне світло також починало поглинатися атмосферним метаном та вуглеводнями, що викликало подальше зменшення світлового потоку. Найменшим він ставав тоді, коли космічний апарат повністю заходив в тінь від плутонового диска. У такі моменти швидкість підрахунку фотонів знижувалася практично до нуля.



Рис. 2. Зображення Плутона з нічного боку показує шари атмосфери, підсвічені променями Сонця (https://en.wikipedia.org/wiki/Atmosphere_of_Pluto#/media/File:Blue_hazes_over_backlit_Pluto.jpg).

А в моменти, коли космічний апарат виходив із тіні Плутона, відбувався зворотний процес. Аналіз отриманих даних дозволив відмітити, що будова атмосфери на протилежних частинах диска Плутона є практично ідентичною.

Отримані спостереженняю апаратурою космічного апарата «New Horizons» результати також дозволили виявити в атмосфері Плутона блакитний серпанок із аерозолів (рис. 3), який охоплював всю карликову планету [18, 19]. На отриманих численних зображеннях висота серпанку досягала висот вище від 200 км. А зображення, що отримані в ультрафіолетовій частині спектра, дозволили зареєструвати серпанок навіть на висотах близько 300 км [1]. Зображення із найкращою якістю дозволяють вказувати на присутність близько 20 окремих шарів. Всі ці шари простягаються в горизонтальному напрямку на відстані більше від 1000 км. А розташування одного й того ж окремого шару серпанку у різних місцях над поверхнею Плутона дещо відрізнялося по висоті [6].

Також вдалося виявити, що над поверхнею у північній полярній області серпанок був у три рази щільнішим, ніж над екваторіальними областями [1]. Товща окремих шарів серпанку по висоті відрізнялась у межах від 1 до понад 10 км [1]. І відстані по вертикалі

між окремими шарами також, зазвичай, не перевищували 10 км [6]. Значення оцінок оптичної товщини серпанку мали величини від 0.004 [2] до 0.013 [4]. Подібні значення викликають зменшення інтенсивності променів світла по вертикалі близько до 1 %. Так звана, характерна шкала висот (тобто висота, на котрій значення її щільності зменшується в $\approx e$ разів) в атмосфері Плутона становить $45 \div 55$ км [2, 4]. Такі величини практично співпадають із шкалою висот для зміни тиску на середніх рівнях висоти планетної атмосфери [5]. На висотах від 100 км до 200 км значення шкали висоти зменшувалося до близько 30 км [4].

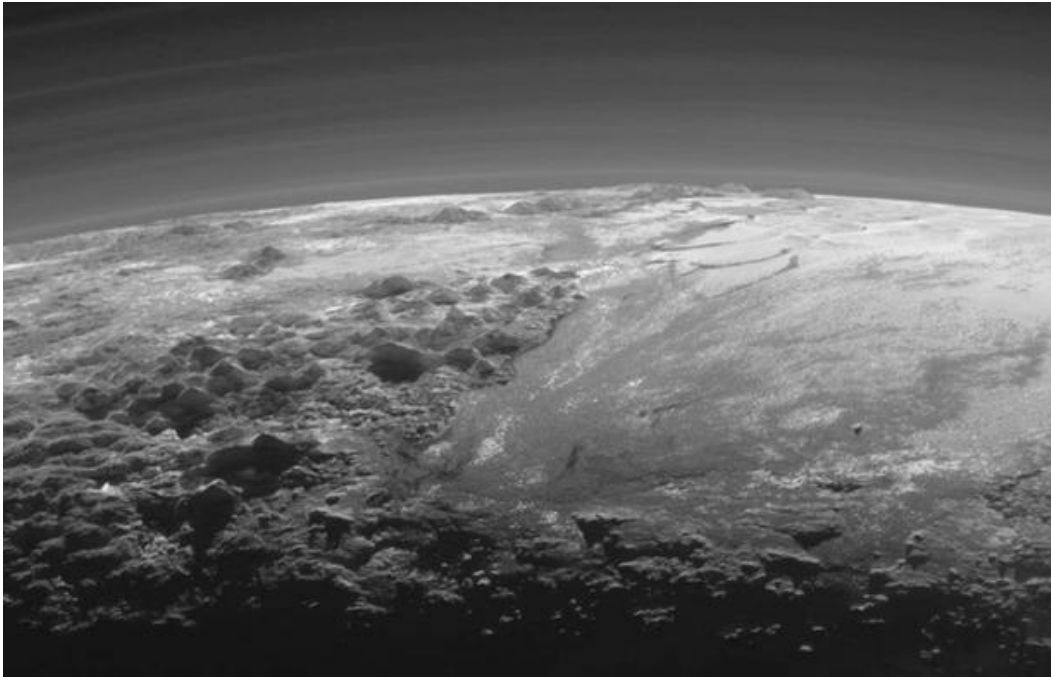


Рис. 3. Видимість окремих шарів серпанку над рівниною Sputnik Planitia та над навколишніми горами. Зображення отримане через 15 хвилин після максимального зближення космічного апарата з Плутоном (<https://kor.ill.in.ua/m/610x0/1684717.png>).

Розмір частинок у такому серпанкові поки що залишається мало дослідженим. Наприклад, її блакитний відтінок вказує на радіус таких часток близько 10 нм. Проте розрахунки фазової залежності яскравості атмосфери на різних фазових кутах вказують на значення радіуса цих же часток понад сотню нанометрів. Одним із можливих пояснень такої поведінки у зміні яскравості серпанку, є об'єднання часток невеликого розміру (у десятки нанометрів) у конгломерати з більшими розмірами: до сотень нанометрів [6, 11]. Вважають, що за фізичних умов, характерних для атмосфери Плутона, такий серпанок, найімовірніше, міг би бути утвореним з часток деяких нелетких сполук, які змогли синтезуватись із знайдених там атмосферних газів під впливом жорсткого сонячного випромінювання. Ці частинки з часом могли повільно випадати на поверхню планети [14]. Час їхнього осідання має становити від декількох земних діб до кількох тижнів [1].

Вважають, що розшаровування серпанку в атмосфері можна пов'язати з гравітаційними хвилями. На наявність таких хвиль вказують ряд результатів, отриманих при спостереженнях покриттів зірок диском Плутона [14]. Самі ж гравітаційні хвилі можуть виникати при атмосферних переміщеннях під дією вітрів, які дмуть над нерівностями рельєфу [6, 20]. Найбільш імовірно, що саме серпанок може спричиняти

злами на спостережуваних кривих падіння інтенсивності випромінювання від Сонця при його проходженні крізь атмосферу, які були отримані з допомогою апаратури космічного зонда «New Horizons» у момент його проходження через тінь Плутона (рис. 1). Там видно, що нижче від рівня висоти приблизно в 150 км атмосфера починає ослаблювати сонячне світло суттєво сильніше, ніж це спостерігалось дещо вище від даного рівня [14]. Подібний «злам» спостерігали і в 1988 році при спостереженнях покриттів зорі Плутоном.

Таку поведінку поглинання можна було інтерпретувати ослабленням світлового потоку серпанком [4], або ж швидким зростанням температури з висотою у нижніх шарах атмосфери Плутона [1]. Останнє пояснення було підтверджено даними, отриманими з допомогою апаратури на космічному зонді «New Horizons». Коли ж атмосфера Плутона стала більш ніж у два рази щільнішою, то при послідовних спостереженнях покриттів зірок, подібного зламу у змінах поглинання світла від зорі – практично вже не спостерігали [13].

Ще одну ознаку присутності серпанків в атмосфері карликової планети спостерігали при покритті зір у 2002 році. У момент, коли Плутон повністю покрив зорю, деяка доля світлового потоку від зорі все ще доходила до спостерігачів на Землі завдяки ефектам заломлення в атмосфері Плутона. Тоді також вдалося виявити, що інтенсивність цього світла зростає при збільшенні його довжини хвилі [3]. Таку особливість, зазвичай, інтерпретують як надійну [8, 9] ознаку розсіювання світла частинками аерозолів. Але вже при наступних спостереженнях покриттів зір Плутоном (наприклад, при спостереженнях 29.06.2015 [8]) такої поведінки у змінах світлового потоку вже не було зареєстровано [9].

Висновки. Отримані характеристики атмосфери навколо Плутона спектральними методами і за допомогою апаратури космічних зондів та спостереженнями у моменти покриття планетою зір ьних оцінок дозволяють припустити наявність розрідженої атмосфери карликової планети. Виявлений серпанок має шарувату структуру і різну щільність у полярних і екваторіальних областях. Пояснено можливу природу зміни фізичних характеристик карликової планети в залежності від інтенсивності випромінювання Сонця.

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. Cheng A.F., Summers M.E., Gladstone G.R., et al. Haze in Pluto's atmosphere. *Icarus*. 2017. Vol. 290. P. 112–133. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.02.024>
2. 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. P. 319–336. DOI: [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(83\)90201-4](https://doi.org/10.1016/0019-1035(83)90201-4)
3. Elliot J.L., Ates A., Babcock B.A., et al. The recent expansion of Pluto's atmosphere. *Nature*. 2003. Vol. 424 (6945). P. 165–168. DOI: 10.1038/nature01762
4. Elliot J.L., Dunham E.W., Bosh A.S., et al. Pluto's atmosphere. *Icarus*. 1989. Vol. 77. P. 148–170. DOI: [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(89\)90014-6](https://doi.org/10.1016/0019-1035(89)90014-6)
5. Elliot J.L., Person M.J., Gulbis A.A.S., et al. Changes in Pluto's Atmosphere: 1988–2006. *The Astronomical Journal*. 2007. Vol. 134 (1). P. 1–13. DOI: <http://dx.doi.org/10.1086/517998>
6. Gladstone G.R., Stern S.A., Ennico K., et al. The atmosphere of Pluto as observed by New Horizons. *Science*. 2016. Vol. 351(6279). DOI: <http://dx.doi.org/10.1126/science.aad8866>

7. Gurwell M., Lellouch E., Butler B., et al. Detection of Atmospheric CO on Pluto with ALMA. *American Astronomical Society*. 2015. DPS meeting №47, id.105.06.
8. Hartig K., Barry T., Carriazo C.Y., et al. Constraints on Pluto's Hazes from 2-Color Occultation Lightcurves. *American Astronomical Society*. 2015. DPS meeting №47, id.210.14.
9. 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>
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: <https://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. - 503, 2004. P. 369–384. DOI: <https://doi.org/10.1007/1-4020-2368-5>
12. Morozhenko A.V., Vidmachenko A.P., Nevodovskiy P.V., et al. On the Efficiency of Polarization Measurements while Studying Aerosols in the Terrestrial Atmosphere. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2014. Vol. 30 (1). P. 11–21.
13. Sicardy B., Widemann T., Lellouch E., et al. Large changes in Pluto's atmosphere as revealed by recent stellar occultations. *Nature*. 2003. Vol. 424 (6945). P. 168–170. DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/nature01766>
14. 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). id.aad1815. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aad1815>
15. Vid'machenko A.P. Temporal changes in methane absorption in Jupiter's atmosphere. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 1997. Vol. 13 (6). P. 21–25.
16. Vidmachenko A.P. Manifestations of seasonal variations in the atmosphere of Saturn. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 1987. Vol. 3 (6). P. 9–12.
17. 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.
18. Vidmachenko A.P. Sedna: the history of the discovery and its features. *Astronomical almanac*. 2005. Vol. 52. P. 201–212.
19. Vidmachenko A.P. *Dwarf planets (to the 10th anniversary of the introduction of the new class of planets)*. *Astronomical almanac*, 62, 2015. P. 228–249.
20. 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.
21. 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.
22. Vidmachenko A.P. Pluto (to the 90th anniversary of the discovery of the planet). *Astronomical almanac*. 2019. Vol. 66. P. 217–229.
23. 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* (Tokyo, Japan, March 9–11, 2022). Chapter 17. Tokyo: CPN Publishing Group, 2022. P. 108–116.
24. Vidmachenko A.P. About discovering and getting of all new information about the now dwarf planet Pluto. *Proceedings of the XIII International Scientific and Prhctical Conference «Modern science: fundamental and applied aspects»* (Beijing, China, December 30–31, 2024). P. 20–26.
25. Vidmachenko A.P. The history of the discovery and study of Pluto's atmosphere. *Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference «Innovative scientific research»* (Toronto, Canada, January 02–03, 2025). P. 4–8. DOI: <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.14610032>
26. Vidmachenko A.P. Updating data on the physical characteristics of the dwarf planet Pluto thanks to research from the “New Horizons” spacecraft. *Proceedings of the 6th International scientific and practical conference “Current trends in scientific research development”* (Boston, USA, 16–18 January 2025). Chapter 52. Boston: BoScience Publisher, 2025. P. 323–332.
27. Vidmachenko A.P., Morozhenko O.V. The study of the satellites surfaces and the rings of the giant planets. *Main Astronomical Observatory NAS of Ukraine*. Kyiv: Ltd. Dia Press, 2012. 255 p.

UDC 523.482

Features of the physical characteristics of Pluto's atmosphere based on observations and model estimates

Anatoliy Vidmachenko, Oleksandr Mozghovyi

Abstract. According to model estimates, the temperature near Pluto's surface varies from 33 K to almost 60 K due to the elongated shape of its orbit. Under such conditions, nitrogen, carbon monoxide, water, and methane freeze. The main component on the surface of the dwarf planet is nitrogen ice. Near the perihelion point, due to heating, it changes from a solid state to a gaseous state, increasing atmospheric pressure. However, Pluto's atmosphere is very thin and consists of nitrogen with admixtures of methane and carbon monoxide. Under the influence of solar ultraviolet radiation, more complex compounds are formed from these compounds: ethane, acetylene, ethylene, etc. When moving to aphelion, these compounds fall to the surface of Pluto. The New Horizons space probe equipment detected a layered blue haze in Pluto's atmosphere, which covered the entire dwarf planet to a height of about 300 km. This haze over the northern polar regions was found to be almost 3 times denser than over the surface in the equatorial region. Most likely, it can be formed from particles that were synthesized from atmospheric gases under the influence of hard solar radiation.

Keywords: Pluto, atmosphere, atmospheric components, haze, modeling.

References

1. Cheng, A.F., Summers, M.E., Gladstone, G.R., et al. (2017). *Haze in Pluto's atmosphere*, Icarus, **290**, 112–133. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.02.024>
2. 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, 1983), 319–336. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(83\)90201-4](https://doi.org/10.1016/0019-1035(83)90201-4)
3. Elliot, J.L., Ates A., Babcock, B.A., et al. (2003). *The recent expansion of Pluto's atmosphere*, Nature, **424** (6945), 165–168. <https://doi.org/10.1038/nature01762>
4. Elliot, J.L., Dunham, E.W., Bosh, A.S., et al. (1989). *Pluto's atmosphere*, Icarus, **77**, 148–170. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(89\)90014-6](https://doi.org/10.1016/0019-1035(89)90014-6)
5. Elliot, J.L., Person, M.J., Gulbis, A.A.S., et al. (2007). *Changes in Pluto's Atmosphere: 1988–2006*, The Astronomical Journal, **134** (1), 1–13. <http://dx.doi.org/10.1086/517998>
6. Gladstone, G.R., Stern, S.A., Ennico, K., et al., (2016). *The atmosphere of Pluto as observed by New Horizons*, Science, **351** (6279). <http://dx.doi.org/10.1126/science.aad8866>
7. Gurwell, M., Lellouch, E., Butler, B., et al. (2015). *Detection of Atmospheric CO on Pluto with ALMA*, American Astronomical Society, DPS meeting №47, id. 105.06.
8. Hartig, K., Barry, T., Carriazo, C.Y., et al. (2015). *Constraints on Pluto's Hazes from 2-Color Occultation Lightcurves*, American Astronomical Society, DPS meeting №47, id. 210.14.
9. 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>
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. <https://doi.org/10.3103/S0884591316010062>
11. Morozhenko, A.V., Vid'machenko, A.P. (2004). *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. <https://doi.org/10.1007/1-4020-2368-5>
12. Morozhenko, A.V., Vidmachenko, A.P., Nevodovskiy, P.V., et al. (2014). *On the Efficiency of Polarization Measurements while Studying Aerosols in the Terrestrial Atmosphere*, Kinematics and Physics of Celestial Bodies, **30** (1), 11–21.
13. Sicardy, B., Widemann, T., Lellouch, E., et al. (2003). *Large changes in Pluto's atmosphere as revealed by recent stellar occultations*, Nature, **424** (6945), 168–170. <http://dx.doi.org/10.1038/nature01766>
14. 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>
15. Vid'Machenko, A.P. (1997). *Temporal changes in methane absorption in Jupiter's atmosphere*, Kinematics and Physics of Celestial Bodies, **13** (6), 21–25.
16. Vidmachenko, A.P. (1987). *Manifestations of seasonal variations in the atmosphere of Saturn*, Kinematics and Physics of Celestial Bodies, **3** (6), 9–12.
17. Vidmachenko, A.P. (1999). *Seasonal variations in the optical characteristics of Saturn's atmosphere*, Kinematics and Physics of Celestial Bodies, **15** (5), 320–331.
18. Vidmachenko, A.P. (2005). *Sedna: the history of the discovery and its features*. Astronomical almanac, **52**, 201–212.

19. Vidmachenko, A.P. (2015). *Dwarf planets (to the 10th anniversary of the introduction of the new class of planets)*, Astronomical almanac, **62**, 228-249.
20. 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.
21. 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.
22. Vidmachenko, A.P. (2019). *Pluto (to the 90th anniversary of the discovery of the planet)*, Astronomical almanac, **66**, 217-229.
23. 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 (Tokyo, Japan, March 9-11, 2022), Chapter 17, CPN Publishing Group, Tokyo, 108-116.
24. 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» (Beijing, China, December 30-31, 2024), 20-26.
25. Vidmachenko, A.P. (2025). *The history of the discovery and study of Pluto's atmosphere*, Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference «Innovative scientific research» (Toronto, Canada, January 02-03, 2025), **32**, 4-8. <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.14610032>
26. Vidmachenko, A.P. (2025). *Updating data on the physical characteristics of the dwarf planet Pluto thanks to research from the "New Horizons" spacecraft*, Proceedings of the 6th International scientific and practical conference "Current trends in scientific research development" (Boston, USA, 16-18 January, 2025), Chapter 52, BoScience Publisher, Boston, 323-332.
27. Vidmachenko, A.P., Morozhenko, O.V. (2012). *The study of the satellites surfaces and the rings of the giant planets*, Main Astronomical Observatory NAS of Ukraine, Ltd. Dia Press, Kyiv.

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 Technical Sciences, Associate Professor, Department of Information and Analytical Activities and Information Security, National Transport University, 1 Mykhaila Omelianovycha – Pavlenka Str., Kyiv 01010, Ukraine.

Отримано / Received 09.10.2025
Прийнято до друку / Accepted 04.11.2025
Опубліковано / Published 26.11.2025