

Changes on Saturn's moon Titan.

Vidmachenko A.P., Steklov O.F.

The year 2024 connects Saturn's moon Titan with a number of jubilee dates. After all, the "Cassini-Huygens" spacecraft reached the Saturn system 20 years ago (July 1, 2004) and became the first artificial satellite of Saturn. On December 25, 2004, the "Huygens" probe created by the European Space Agency separated from the "Cassini" spacecraft and began its independent journey to Titan. Another "round" date concerns the 80th anniversary of the discovery in 1944 of the methane absorption band in Titan's spectrum, and the 50th anniversary of the discovery of molecular hydrogen in its atmosphere by spectroscopic methods. And 45 years ago, in 1979, radiometric measurements in the thermal infrared range on the flying observatory allowed for the first time to determine the brightness temperature of Titan – about 80 K. Titan is the largest moon of Saturn with a diameter of 5,152 km, and the second largest in the Solar System after Jupiter's moon Ganymede. The plane of the satellite's orbit and its equatorial plane practically coincide with the plane of Saturn's rings. Therefore, it is illuminated by the Sun in the same way as Saturn itself. This means that in 29.46 Earth years, Titan also alternately leans toward the Sun in the northern and southern polar regions. And this leads to periodic changes in the inflow of solar energy to its northern and southern hemispheres, which causes seasonal changes on the satellite. Therefore, the main reason for the sharp contrast in the landscapes around the opposite poles of Titan is most likely the differences in natural conditions between the winter and summer seasons in these regions. At the equinox in 2023/2025, the Southern Hemisphere of Titan will see the end of winter, and the Northern Hemisphere - the end of summer. Therefore, it would be very appropriate in 2023-2025 to conduct infrared observations with the Keck telescopes, space telescopes and the Very Large Telescope in order to test our hypothesis about seasonal changes on Titan. This opens up new opportunities for comparative studies of the seasonal dynamics of changes in the sufficiently powerful atmospheres of Titan and our planet Earth.

Зміни на супутнику Сатурна Титані.

ВІДЬМАЧЕНКО А.П., СТЕКЛОВ О.Ф.

Вступ.

2024 рік пов'язує супутник Сатурна Титан із цілим рядом ювілейних дат. Так, космічний апарат (КА) «Кассіні – Гюйгенс» **20 років** тому досягнув системи Сатурна – 1.07.2004. Це сталося після семирічної міжпланетної подорожі від нашої планети Земля. Трасекторія цього польоту включала двократний обліт Венери, здійснення додаткового гравітаційного маневру навколо Землі, проліт на відстані 380 тис. км від Місяця для отримання калібрувальних світлин цього супутника. А в кінці 2000 року КА виконав кількамісячну програму наукових вимірювань у ході прольоту біля Юпітера. Зокрема, ним було отримано до 26 тис. зображень цієї планети і його околиць. І лише в середині 2004 року він став першим штучним супутником Сатурна. 25.12.2004 від КА «Кассіні» відокремився створений Європейським космічним агентством зонд «Гюйгенс», почавши самостійне переміщення до Титана.

Ще одна ювілейна дата стосується **80-тої річниці з моменту виявлення в 1944 році у спектрі Титана смуги поглинання метаном**, та **50-тої річниці з моменту відкриття у його атмосфері спектроскопічним методом молекулярного водню**. Через легкість цього газу для даної маси Титана – здавалося неможливим його утримання. Проте пояснити факт поточного існування водню в атмосфері супутника можна припущенням, що він може бути продуктом фотодисоціації аміаку та метану, які весь час виділяються із його надр. **45 років тому у 1979 р. дуже складні радіометричні вимірювання в тепловому інфрачервоному діапазоні на літаючій обсерваторії дали змогу вперше визначити яскравісну температуру Титана – близько 80 К.**

Особливості опромінення системи Сатурна Сонцем.

Така планета Сонячної системи як Сатурн має нахил $B \approx 26^\circ 44'$ площини екватора до площини його орбіти. Тому за час обертання навколо Сонця протягом 29.46 років спостерігаються значні відмінності у надходженні сонячної енергії до різних широтних поясів планети. Саме тому ця планета з 1977 року була об'єктом нашого дослідження за сезонними змінами у її атмосфері. Наші розрахунки [16] показали, що Сатурн проходить перигелій орбіти близько до епохи літа у південній півкулі; а в афелії – маємо літо у північній півкулі. Через витягнутість орбіти південна півкуля Сатурна отримує від Сонця майже на четверть більшу енергію, ніж північна. Особливо відчутні такі відмінності на помірних і полярних широтах. Кільця додатково закривають доступ сонячного світла до хмар Сатурна, посилюючи сезонні контрасти на планеті [17]. Подібні зміни в опроміненні атмосфери позначаються на фізичних характеристиках хмар, туману над ними та на вертикальній структурі всієї тропосфери, де вони утворюються [15, 22]. Тому їх пов'язують із сезонними змінами [1] притоку сонячної енергії.

Характеристики Титана.

Найбільший супутник Сатурна Титан має діаметр 5152 км. Він є другим за розмірами у Сонячній системі [19] після супутника Юпітера [3, 10] Ганімеда [21]. За 15.945 земних діб він обертається на середній відстані 1221870 км від Сатурна. Період його обертання по орбіті є синхронізованим з обертанням навколо планети. Площина орбіти супутника і його екваторіальна площина практично співпадають з площиною кільця Сатурна. Тому він освітлюється Сонцем так же, як і сам Сатурн [16]. А це означає що за 29.46 земних років Титан також почергово нахиляється до Сонця то північною, то південною полярною областями. Це призводить до періодичних змін у надходженні сонячної енергії до його північної і південної півкуль.

Нагадаємо також, що *80 років тому, у 1944 р. Дж. Койпер відкрив потужну атмосферу Титана*. Як пізніше виявилось, вона на понад 95% складається з азоту із домішками переважно метану і незначними долями деяких інших газів. Товщина цієї атмосфери навіть по висоті видимих верхніх рівнів хмар складає від 200 до 500 км. Це створює тиск біля поверхні майже у 1.5 бари [13]. Температура на поверхні супутника становить близько 94 К, що є температурою конденсації азоту. Через доволі густі хмари, поверхня Титана довго залишалася невидимою. І тільки перші радарні дослідження з космічних апаратів та спостереження в інфрачервоній (ІЧ) ділянці спектра з телескопом Хаббла, телескопами Кека і з Дуже Великим телескопом (ДВТ) вказали на можливість існування на поверхні Титану морів, озер і боліт із рідкого азоту, островів із замерзлої води і метану та із силікатів на «сухий» поверхні. Тоді ж було зареєстровано і випадання метанових дощів.

Ці факти дозволили висунути пропозиції щодо порівняння водного циклу на планеті Земля з процесами на Титані. Ми звернули увагу [21] на можливість існування так званих сезонних змін у потужній атмосфері Титана [25]. Ці зміни повинні викликати періодичну перебудову і варіації фізичних характеристик почергово у північній і південній півкулях супутника [27], аналогічно до існуючих сезонних змін в атмосфері Сатурна [8], Юпітера [2, 11], Марса [20] чи Землі [5-7].

Особливості хмар на Титані.

Ще спостереження з Землі показали, що переважна більшість змін у видимих хмарах на Титані формувалися протягом тривалого періоду, який цілком міг бути пов'язаний із змінами сезонів. Грунтуючись на різних моделях циркуляції було запропоновано, що подібна перебудова хмар для більшості широтних поясів може тривати на супутнику до 22-25 років. Адже саме протягом такого часу полярні області однієї із півкуль освітлюються сонячним

світлом. А полярні області протилежної півкулі у цей же час перебувають у полярній ночі. І там активність процесів майже повністю припиняється на 4-7 років. По закінченні цього періоду активність процесів в атмосфері супутника відновлюється на наступний схожий термін вже у протилежній півкулі.

Характеристики та особливості процесів в атмосфері Титана протягом досить тривалого часу і достатньо детально вдалося вивчати апаратурою КА «Кассіні» та з допомогою ІЧ спостережень на вище згадуваних великих телескопах.

Також досить короткотермінові спостереження вертикальної будови атмосфери супутника були проведені паралельно при спуску модуля «Гюйгенс» та з апаратурою КА «Кассіні». Вони дозволили зареєструвати існування густих хмар на висотах 26-30 і 19-23 км з метану, та із рідкого смогу на висотах 18-19 км і на деяких інших рівнях в атмосфері супутника. Густіші хмари своєю будовою виявилися дуже схожими на земні купчасті утворення [4, 14]. Відмінними були лише розміри краплин метану на Титані та земних крапель води. Їх розміри на супутнику були майже у 100 разів більшими! Тому, при практично однаковому рівні вологості, краплини в хмарах на Титані розташовуються ще й на значно більшій відстані одна від одної, а хмари на супутнику мають значно меншу щільність.

Отримані спостережні дані вказали на наявність постійної циркуляції в атмосфері Титана у моменти проведених спостережень. Було зареєстровано, що величезні маси дещо тепліших газів на висоті близько 7 км рухалися від південної півкулі до північної полярної області, там опускалися і поверталися назад. Результати комп'ютерної симуляції глобальної циркуляції атмосфери та вимірювання в інфрачервоному діапазоні показали, що інтегральна температура поступово знижувалася при переході з півдня на північ. У момент посадки зонда саме в тому місці була зима [2]. Через відмінності в умовах сезонного нагрівання протилежних півкуль Титана, реєструвалися ще й значні відмінності у значеннях тиску між півкулями. Нагадаємо, що саме південна півкуля в моменти цих спостережень була нахилена до Сонця.

Атмосфера Титана обертається в той же бік, що й супутник у цілому, але значно швидше (ефект супер-ротації). Зондом «Гюйгенс» приблизно через 10 хвилин після початку свого опускання – у стратосфері – була зареєстрована максимальна швидкість вітру зі значенням 160 м/с; на висотах 120-150 км – близько 100 м/с; на висоті в 60 км швидкість вітру значно зменшилася і після висоти 7 км її значення складало лише кілька м/с; на поверхні реєструвався тільки легкий бриз із швидкостями до 0.3 м/с.

Відмічалось, що на висоті 6 км, а потім – на висоті 0.7 км над поверхнею вітер двічі змінив свій напрям. Вважають, що саме ці два значення висоти в атмосфері Титана [9] говорять про циркуляційний процес, відомий як ячейка Хедлі. Причому, ця велетенська ячейка циркулювала у роки спостережень від південного до північного полюса у верхніх шарах атмосфери, і в зворотному напрямку біля поверхні супутника. І саме вона була основним шляхом переносу тепла в атмосфері. Тому у південних широтах Титана було на 10 К тепліше, ніж навіть на екваторі. Таке південне літо там продовжувалося до 2010 р. Після цього Сатурн став нахилитися на орбіті так, що вже північна його півкуля почала все сильніше нагріватися Сонцем.

Така величезна ячейка Хедлі може існувати лише на об'єктах із дуже повільним обертанням. Нагадаємо, що на Титані доба триває майже 16 земних діб. Тому, незважаючи на те, що ці ячейки керуються однаковими механізмами, але система потоків повітря на Титані досить суттєво відрізняється від того, що реєструється на Землі [20]. Даний факт є важливим з точки зору *порівняльної планетології*. Адже він дозволяє вивчати суттєво іншу від Землі кліматологічну систему у порівняльному аспекті.

Прямі вимірювання з модуля «Гюйгенс» показали, що температурний мінімум у тропопаузі атмосфери Титана розташований на висоті близько 45 км над поверхнею при температурі близько 70 К і тискові 0.12 бар. Нижче від цього рівня температура росте, і біля поверхні досягає майже 94 К. Вище рівня тропопаузи – розташована стратосфера, де температура знову підвищується з висотою. За отриманими зондом «Гюйгенс» даними, в атмосфері було досить темно на протязі спуску протягом понад сотню останніх кілометрів.

Адже крім потужних хмар там спостерігався ще й досить помітний туман, який дещо порідшав тільки на малих висотах.

Виявилося, що в оптичному діапазоні протяжний шар хмар і туманів пропускав до поверхні менше 10% падаючого світла. У міру занурення від висоти 140 км, колір неба від світло-жовтого відтінку ставав усе червонішим. І вже на висоті 50 км максимум випромінювання у спектрі неба змістився до довжин хвиль 560-680 нм оранжево-червоних кольорів. А довжини хвиль 1270-1550 нм розташовані у вікні прозорості атмосфери Титана. Там прозора майже так само, як і в земній атмосфері в оптичному діапазоні. Тому якщо у видимих променях на Титані завжди похмуро, то в ІЧ діапазоні з поверхні Титана видно і Сатурн, і Сонце.

Метанові хмари в тропосфері Титана виявилися дуже динамічними. Аналіз спостережних даних показав, що зазвичай вони виникають буквально протягом півгодини при підйомі повітряних мас із середньої тропосфери до рівня тропопаузи [12]. Після випадання дощами на поверхню супутника, хмари розсіювалися протягом наступної години.

Характеристики сезонних змін.

Інколи в атмосфері Титана спостерігали і хмари з етанового снігу. Наприклад, у зимовій північній півкулі супутника подібну хмару спостерігали з апаратурою «Кассіні» на всіх можливих довготах на широтах (50÷70)°. Вважають, що саме конденсацією етанового снігу навколо полярних областей Титана в моменти полярної зими можна пояснити практичну відсутність рідких водоймищ етану аж до тропічних широт. Поблизу місця посадки «Гюйгенса» річкові русла навіть у приекваторіальній зоні Титана також виявилися не заповненими рідиною. Спеціальні дослідження показали, що вони могли бути сезонними руслами, які наповнюються тільки у той період року, в який випадають опади. Тоді як у момент посадки зонда – там був «сухий» сезон [26].

Прошло до двох років після посадки «Гюйгенса», перш ніж сезонна гіпотеза отримала прямі підтвердження для моментів закінчення зими у північному полярному районі Титана при радарних дослідженнях з КА «Кассіні».

Нагадаємо, що основний хімічний компонент атмосфери на Титані і Землі співпадає: ним є азот. Однак хімічний склад решти елементів суттєво відрізняється від їх земних аналогів. Адже роль кам'яних гірських порід на Титані відведена водному льоду [20, 21], а роль земної води – виконує рідкий метан з добавками. Яскравіші плями у темних морях і озерах є островами різних розмірів. Тому знайдені весною у північній півкулі озера стали серйозним доказом наявності циклу круговороту рідини на Титані. Адже при такому циклі саме початок випадання весною сильних метанових опадів і послідує наповнення озер, яке супроводжувалося підняттям ґрунтових рідин, є підтвердженням сезонних змін.

29.46-річний період обертання Сатурна довкола Сонця, і викликана цим фактом зміна сезонів добре пояснює те, що під час роботи «Кассіні» у 2008-2017 рр. у північній півкулі йшли сильні дощі. Тому там було зареєстровано велику кількість озер. Тоді як у південній півкулі практично всі водойми у ті часи поступово висихали. Багато з водойм у північних широтах були набагато більшими, ніж навіть деякі моря на Землі. Наприклад, радар «Кассіні» зафіксував найбільше таке темне місце на поверхні поблизу північного полюса супутника (рис. 1). Саме отримані апаратурою «Кассіні» зображення поверхні в ІЧ діапазоні дозволили уточнити ще й хімічний склад місцевості у північному полярному регіоні, та підтвердили наявність там рідких метану й етану. Такі великі темні ділянки розповсюджувалися далі, ніж на 1000 км від полюса. На 2008 р. радари «Кассіні» просканували до 60% північного полярного регіону вище 60° по широті. Виявилося, що озерами із вуглеводнів розмірами від одиниць до сотень кілометрів було вкрито шосту частину цієї області [30]. Після цього розпочалися радарні спостереження раніше мало вивченого регіону навколо південного полюсу. Це дозволило виявити суттєві відмінності між північною та південною полярними областями Титана. За зимовим південним полярним колом вдалося знайти всього одне велике озеро з

розміром до 230 км, три невеликих озера і декілька невеличких плям біля 70° пд. ш. Там же знайшли велику кількість сухих округлих западин, котрі були схожими своєю формою на кратери [23, 24] та на північні озера. Також, було знайдено великого розміру структуру з пониженням, котру можна інтерпретувати як басейн з під висохлого моря із системою річок і каналів, які наповнювали його.

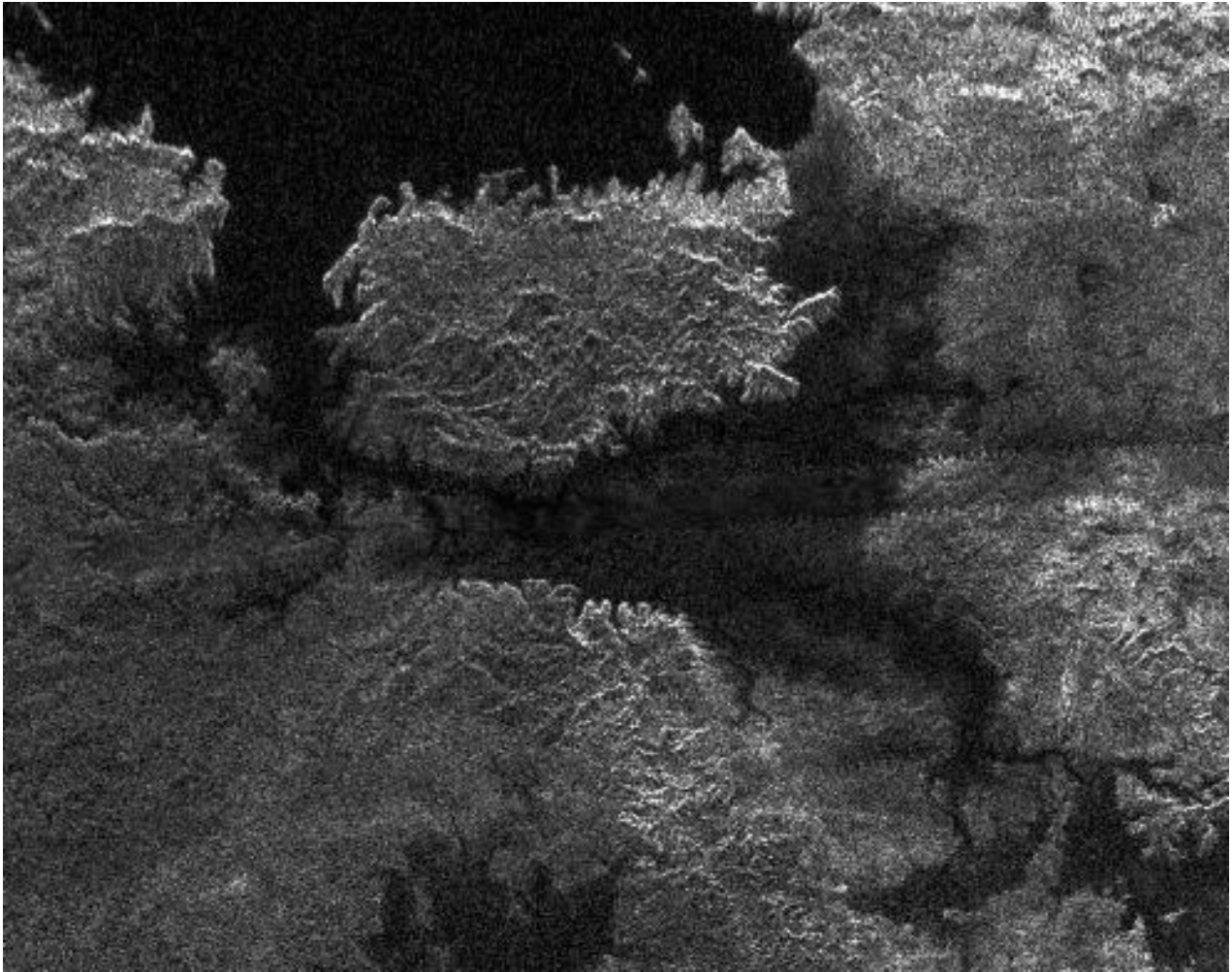


Рис. 1. Знімки поверхні з КА «Кассіні» в інфрачервоному діапазоні показали присутність фрагментарних морів навколо північного полюса Титана (http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo_gallery).

Інші «сухі» частини південних областей також показували схожість із відповідними північними регіонами. По схожості значної кількості подібних елементів навколо обох полюсів можна говорити про те, що полярні області Титана точно знаходяться під впливом погодних умов, котрі періодично кардинально змінюються. Тривалість сезону на Титані складає майже 7.5 років, що становить 1/4 від сатурніанського року у ~29.46 земних років.

Після ретельних досліджень цих сезонних змін [28, 29], було запропоновано кілька механізмів, котрі можуть формувати на супутнику вуглеводневі водоймища вищенаведених типів. Знайдені на Титані озера мають величезний інтервал наповнюваності. Це говорить про їх тривалу еволюцію, а також про те, що вони являються ланками у ланцюзі, подібному до земного круговороту води.

А отже, Титан є унікальним тілом серед тих, котрі знаходяться на далеких відстанях у Сонячній системі. Існуючі там водойми [18] значно відрізняються своїми розмірами (від 1 до 100000 км²). Причому, понад 70% обстеженої території займають великі озера. Наприклад, із 400 знайдених озер більшість мали розмір понад 26000 км². Найбільша за розміром водойма – Море Кракен – досягала у поперечнику 1200 км при площі майже 400000 км². Комбінація різних радарних досліджень дозволила встановити, що практично всі озера пов'язані між

собою, і є частиною одного великого моря із рідкого етану, з'єднаного з метаном і розчиненим у ньому азотом. За розрахунками, етан складає близько 10% об'єму всієї рідини.

Висновки.

Таким чином, основною причиною різкого контрасту в ландшафтах навколо протилежних полюсів Титана, найімовірніше, є відмінності природних умов між зимовим та літнім сезонами [5] у цих регіонах. Можна передбачити, що в момент рівнодення у 2023 р. у південній півкулі Титана спостерігатиметься кінець зими, а в північній – кінець літа. І саме в ці моменти існуючі обриси озер і морів зазнають кардинально протилежних змін. Адже поступове нагрівання південної полярної області приведе там до підйому випаруваного метану, утворення густих хмар, випадання метанових дощів, перенесення теплішої частини атмосфери до протилежного північного полярного регіону і до її охолодження, опускання і потім до повернення у зворотному напрямку. Випавші дощі заповнять висохлі до цього південні низини.

А навколо північного полюса практично вся рідина вимерзне, і там збережуться тільки залишки найкрупнішого моря та декілька озер скромних розмірів.

Тому було б дуже доречно у 2023-2025 рр. провести відповідні спостереження в ІЧ діапазоні з телескопами Кека, космічними телескопами та Дуже Великим телескопом з метою перевірки даної гіпотези щодо сезонних змін на Титані. У сукупності, все це відкриває нові можливості для порівняльних досліджень сезонної динаміки змін у достатньо потужних атмосферах Титана та нашої планети Земля.

References

1. Cess R.D., Cocran J.A. (1979) Saturnian stratospheric seasonal climate model. *Icarus*. 38, p. 349-357.
2. Klimenko V.M., Morozhenko A.V., Vid'machenko A.P. (1980) Phase effect for the brightness coefficient of the central disk of Saturn and features of Jupiter's disk. *Icarus*. 42(3), p. 354-357.
3. Kuznyetsova Yu., Matsiaka O., Shliakhetskaya Ya., et al. (2013) Spectral Research of Solar System Giant Planets Using 2-m Telescope at the Peak Terskol. *Observing techniques, instrumentation and science for metre-class telescopes. Workshop*. Tatranská Lomnica. Slovakia. 23-26.09.2013. Abstract book. Edited by Richard Komžik, Theodor Pribulla. P. 29.
4. Morozhenko A., Vid'machenko A. (2005) Polarimetry and physics of solar system bodies. *NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry*, vol 161. p. 369-384.
5. Nevodovskyi P.V., Morozhenko O.V., Vidmachenko A.P., et al. (2015) Tiny Ultraviolet Polarimeter for Earth Stratosphere from Space Investigation. *IEEE 8th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS-2015)*. 24-26 September 2015. Warsaw, Poland. Proceedings. 1. P. 28-32.
6. Nevodovskyi P., Vidmachenko O., Morozhenko A., et al. (2018) Reliable stratospheric aerosol of the earth's atmosphere observations. *Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies*. DESSERT 2018. P. 631-636.
7. Ovsak O., Vashchenko V., Vid'machenko A., et al. (2021) Recovery of Parameters for the Multimodal Aerosol Component in the Atmosphere from Spectral Polarimetric Measurements. *Ukrainian Journal of Physics*. 66(6), p. 466-477.
8. Steklov A.F., Vidmachenko A.P., Miniailo N.F. (1983) Seasonal variations in the atmosphere of Saturn. *Soviet Astronomy Letters*. 9. Mar.-Apr. P. 135, 136.
9. Tokano T., Neubauer F.M., Laube M., McKay Ch.P.T. (2001) Three-Dimensional Modeling of the Tropospheric Methane Cycle on Titan. *Icarus*. 153(1), p. 130-147.
10. Vid'machenko A.P. (1991) Giant planets – Theoretical and observational aspects. *Astronomicheskii Vestnik*, 25, May-June. P. 277-292.
11. Vid'Machenko A.P. (1985) On the activity of Jupiter's atmosphere. *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel*. 1(5), p. 91.
12. Vid'Machenko A.P. (1999) Variations in Reflective Characteristics of Jupiter's Atmosphere. *Solar System Res*. 33(6), p. 464-469.
13. Vidmachenko A.P. (2016) Activity of processes on the visible surfaces of Solar System bodies. *Astronomical School's Report*. 12(2), p. 14-26.
14. Vidmachenko A.P. (2009) Planetary atmospheres. *Astronomical School's Report*. 6(1), p. 56-68.
15. Vidmachenko A.P. (1984) Reflectivity of Saturn's south equatorial region from 1977 through 1981. *Astronomicheskii Vestnik*. 18, July-Sept. P. 191-198.

16. Vidmachenko A.P. (2015) Seasons on Saturn. I. Changes in reflecting characteristics of the atmosphere at 1964-2012. *Astronomical School's Report*. 11(1), p. 1-14.
17. Vidmachenko A.P. (2015) Seasons on Saturn. II. Influence of solar activity on variation of methane absorption. *Astronomical School's Report*. 11(1), p. 15-23.
18. Vidmachenko A.P. (2018) Water in Solar system. *20 International scientific conference Astronomical School of Young Scientists*. May 23-24, 2018. Uman. Ukraine. P. 91-93.
19. Vidmachenko A.P., Morozhenko O.V. (2017) The physical characteristics of the surface of the satellites and rings of giant planets. Kyiv: Editorial and publishing department of NUBiP of Ukraine. -412 p.
20. Vidmachenko A.P., Morozhenko O.V. (2014) The study Earth-like planets using spacecraft. *Astronomical School's Report*. 10(1), p. 6-19.
21. Vidmachenko A.P., Morozhenko O.V. (2012) The study of the satellite's surfaces and the rings of the giant planets. Main Astronomical Observatory NASU Press, Kyiv, Ltd. Dia. -255 p.
22. Vidmachenko A.P., Morozhenko A.V., Klimenko V.M. (1980) Phase effect for the brightness coefficient of the central disk of Saturn and features of Jupiter's disk. *Icarus*. 42(3), p. 354-357.
23. Vidmachenko A.P., Steklov A.F. (2022) Features of lunar volcanism. *Proceedings of the 8th International scientific and practical conference. International scientific innovations in human life*. Cognum Publishing House. Manchester, United Kingdom. 16-18.02.2022. P. 180-188.
24. 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*. BoScience Publisher. Chicago, USA. 23-25.02.2022. P. 195-204.
25. Vidmachenko A.P., Steklov A.F. (2022) Methane circulation on Saturn's moon Titan. *Proceedings of the 11th International scientific and practical conference. Science, innovations and education: problems and prospects (01-03 June 2022). Chapter 62*. CPN Publishing Group. Tokyo, Japan. P. 425-434.
26. Vidmachenko A.P., Steklov A.F. (2022) The surface of Saturn's moon Titan. *Proceedings of the 10th International scientific and practical conference. Innovations and prospects of world science (25-27 May 2022). Chapter 65*. Perfect Publishing. Vancouver, Canada. P. 376-385.
27. Vidmachenko A.P., Steklov A.F., Hrudynin B.O. (2022) Seasonal activity of "tiger" stripes on Enceladus // *Proceedings of the 12th International scientific and practical conference. International scientific innovations in human life (08-10 June 2022). Chapter 60*. Cognum Publishing House. Manchester, United Kingdom. P. 365-375.
28. Vidmachenko A.P., Steklov A.F., Minyailo N.F. (1984) Seasonal activity on Jupiter? *Pisma v Astronomicheskii Zhurnal*. 10. Sept. P. 691-695.
29. Vidmachenko A.P., Steklov A.F., Minyajlo N.F. (1984) Seasonal activity on Jupiter. *Soviet Astron. Let.* 10(5), p. 289-290.
30. Wood C.A., Lorenz R., Kirk R., et al. (2010) Impact craters on Titan. *Icarus*. 206(1), p. 334-344.