

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2021.01.057>

УДК 523.4

**А. П. Відьмаченко**

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України  
вул. Академіка Заболотного 27, Київ, Україна, 03143  
vida@mao.kiev.ua

## Особливості рівнодення Сатурна у 2010 році

Екватор Сатурна нахилений до площини орбіти на кут  $26.75^\circ$ ; період обертання планети довкола Сонця становить 29.45 років. Через ексцентриситет орбіти  $e = 0.056$  південна півкуля Сатурна отримує на 25 % більше сонячної енергії, ніж північна, тому що перигелій орбіти Сатурн проходить в епоху літа у південній півкулі, афелій — в епоху літа у північній. Це позначається на фізичних характеристиках і вертикальній структурі атмосфери. Ми зареєстрували зміни на Сатурні і пов'язали їх із сезонним надходженням сонячної енергії. Для аналізу ми використали результати спостережень у моменти рівнодення в 1966, 1980, 1995 і 2010 рр. Широтні відмінності метанового поглинання по диску показали істотну асиметрію між північною й південною півкулями. При цьому зміна поглинання у протилежних півкулях відбувається по-різному. В ідентичних умовах попередньої історії планети у 1966 і 1995 рр. поглинання у північній літній півкулі було більшим, ніж у південній. Протилежний ефект спостерігався у 1980 р., коли поглинання було більшим у південній літній півкулі. Останнє рівнодення на Сатурні було у 2009 р. Всупереч сподіванням, що воно буде схожим на картину 1980 р., жодної суттєвої різниці поглинання між півкулями у 2009 р. не було зафіксовано, на відміну від рівнодень 1966, 1980 та 1995 рр., коли спостерігалась явна асиметрія поглинання у півкулях. При цьому у північній зимовій півкулі поглинання не зменшилося, а у літній південній — помітно зросло. На відміну від попередніх трьох рівнодень, у рівнодення 2009 р. мав місце мінімум сонячної активності. Комбіновані спостереження КА «Вояджер» у 1980 р. і «Кассіні» у 2010 р. показали, що за один сатурніанський рік тропічна атмосфера у тропічній зоні нагрілась на 10 К. Враховуючи ці відмінності та те, що у 2010 р. індекс сонячної активності

дорівнював  $R = 0$ , а у 1980 р. — понад 150, оцінюємо, що радіаційна стала воднево-гелієвої атмосфери Сатурна дорівнює приблизно 4.5 земних років. А потепління у тропопаузі змінило атмосферну стратифікацію і стабільність та вплинуло на великомасштабну динаміку верхньої тропосфери у 2010 р.

**Ключові слова:** Сатурн, атмосфера, сезонні зміни, метанове поглинання, рівнодення.

**Відомості про освітлення планети Сонцем.** Більшість планет Сонячної системи (Венера, Земля, Марс, Сатурн, Уран, Нептун) мають значний нахил площини екватора до площини орбіти. Тому для них протягом часу обертання навколо Сонця спостерігаються значні коливання надходження сонячної енергії до різних широт. Оскільки екватор Сатурна нахилений до площини орбіти на кут  $B = 26^\circ 44'$ , а його період обертання довкола Сонця становить 29.45 років, ми мали можливість дослідити зміни в атмосфері Сатурна протягом кількох сезонів, починаючи з 1977 р. Наші розрахунки [43] показали, що південна півкуля Сатурна отримує у середньому більше сонячної енергії, ніж північна. Це викликано тим, що перигелій орбіти Сатурн проходить близько до епохи літа у південній півкулі, а афелій — в епоху літа у північній; у моменти рівнодення планета перебуває на середніх до Сонця відстанях. При значенні ексцентриситету орбіти  $e = 0.056$  південна півкуля сумарно отримує майже на 25 % більше сонячної енергії, ніж північна. Особливо відчутні зміни надходження сонячної енергії спостерігаються на середніх та високих широтах. Адже при максимальних кутах нахилу вони можуть на порядки перевищувати надходження енергії при видимості кілець Сатурна з ребра (рис. 1). Значна частина зимових областей планети перебуває ще й у тіні від кілець, котрі додатково зменшують надходження сонячної радіації до хмарового шару планети і підсилюють сезонні контрасти припливу енергії від Сонця [38, 46, 51].

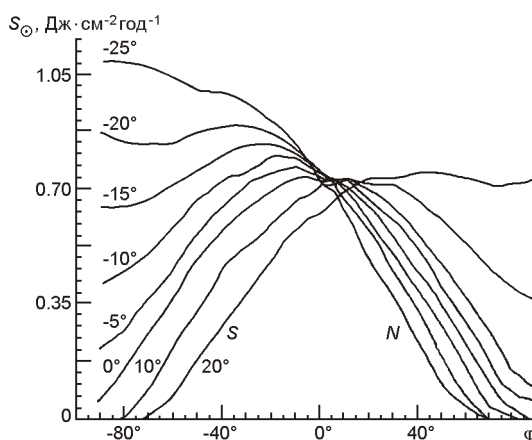


Рис. 1. Надходження сонячної енергії до атмосфери Сатурна при різних значеннях кута нахилу кілець (числа біля кривих)

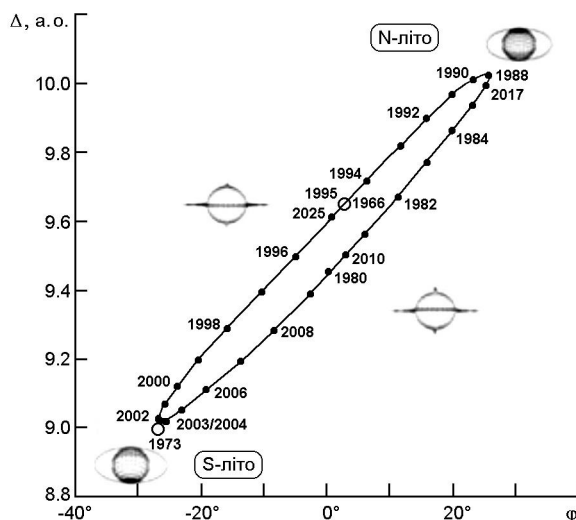


Рис. 2. Зміна радіуса-вектора Сатурна при зміні сатурноцентричного схилення за період 1966—2025 рр.

Такі зміни режиму опромінення атмосфери на різних широтах позначаються на фізичних характеристиках хмар, туману над ними та на вертикальній структурі тропосфери, де утворюються хмари і формується зональна структура, видима у широкому спектральному діапазоні. Природно, що зміни сезонного припливу сонячної енергії помітніше позначатимуться на вищих рівнях атмосфери, де формується випромінювання УФ-частини спектру та деяких смуг поглинання метаном. Саме там ми і зареєстрували зміни відбивних та випромінювальних характеристик Сатурна [36, 50], і пов'язали їх із сезонними варіаціями [5, 39, 40] надходження сонячної енергії. Адже при зміні відстані планети від Сонця і при затіненні кільцями деяких регіонів атмосфери шар основних аміачних хмар також змінюватиметься із глибиною, викликаючи варіації поглинання метаном.

Окрім результатів наших фотометричних і спектральних спостережень [14, 36, 39, 43, 44, 45, 49], для проведення даного аналізу ми використали результати спостережень [1, 13, 19, 25, 28], численні аматорські спостереження\* та дані з космічних апаратів і космічних телескопів [18] за час між чотирма послідовними проходженнями площини кільця планети через площину земної орбіти у моменти рівнодення, які повторюються для Сатурна кожні 14.7 років. Це моменти 1966, 1980, 1995 і 2010 рр., коли Сатурн перебував на середній відстані від Сонця, а обидві півкулі однаково опромінювалися Сонцем (рис. 2).

**Зміни відбивальних характеристик у смугах поглинання.** У 1966 та 1995 рр. кільця було видно на Землі із ребра, і тоді Сатурн перебував на середній відстані від Сонця; після цього планета почала

\* <http://kardasis.weebly.com/>, <http://obs.nineplanets.org/obs/obslist.html>,  
<http://www.acquerra.com.au/astro/gallery/jupiter/index>

наближатися до нього (рис. 2). Цілком можливо, що тоді видимий шар хмар в атмосфері Сатурна залягав досить глибоко. І це могло б пояснити більші значення еквівалентної ширини метанових смуг [37, 41, 42, 47], оскільки після нагрівання світлом від Сонця частинки  $\text{NH}_3$  вже при температурі близько 190 К сублімуватимуть протягом кількох діб. А коли аміачні хмари не поповнюватимуться новим матеріалом, то спектральні спостереження покажуть добре помітні зміни глибини залягання цих хмар за час, менший від земного року [41, 48].

Як видно із рис. 2, після 1964 р. найсильніша інсоляція південної півкулі спостерігалася у 1973 та 2002 рр., коли Сатурн перебував найближче до Сонця; тоді там було літо, а кільця закривали переважну частину його північної півкулі. При такій комбінації зростання поглинання метаном  $\text{CH}_4$  і воднем  $\text{H}_2$  має відображати мінімальні висоти залягання видимої частини аміачних хмар. Це пов'язано з тим, що туман та розріджені аміачні хмари менше закриватимуть аміачний і метановий газ, і їх значно легше буде виявляти і досліджувати при спектральних спостереженнях атмосфери.

При віддаленні Сатурна від Сонця і при зменшенні видимого розкриття його кілець основний шар хмар продовжував осідати, призводячи на деякий час до утворення висотних туманів. Через значні варіації нахилу кілець щодо наземного спостерігача форма спостережуваних розподілів яскравості по центральному меридіану буде помітно різною навіть із геометричних причин. Адже кільця та диск планети мають різні спектральні відбивальні характеристики [38].

Використовуючи вищевказані спостережні дані, ми простежили зміни розподілів яскравості у різних широтних поясах за час між чотирма послідовними проходженнями площини кілець планети через площину земної орбіти, у моменти рівнодень із майже однаковими умовами освітлення північної й південної півкуль на Сатурні у 2010, 1995, 1980 і 1966 рр. Починаючи від 1966 та після 1995 рр. кільця поступово перекривали усе ближчі до полюсів широтні пояси у північній півкулі Сатурна; у 1973 і 2002 рр. вони вже повністю закривали її вище широти  $+8^\circ$ ; від 1973 до 1980 та від 2002 до 2009 рр. тінь від кілець на диску планети зменшувалась, і у 1980 та 2009—2010 рр. кільця знову спостерігалися з ребра. Починаючи від 1980 та після 2010 рр. кільця поступово закривали усе ближчі до полюсів широтні пояси вже у південній півкулі Сатурна, і у 1987 та у 2017 рр. вони повністю закривали його вище широти  $-8^\circ$ ; від 1987 до 1995 рр. та після 2017 р. тінь від кілець знову зменшувалась, і у 2010 р., а також у 2024 р. кільця спостерігаються з ребра.

Широтні відмінності метанового поглинання по диску показали істотну асиметрію між північною й південною півкулями. Причому екваторіальний пояс характеризується найменшим поглинанням серед усіх смуг. А зміна поглинання на середніх широтах у північній і південній півкулях відбувається по-різному. Так, при видимості кілець із ребра в ідентичних умовах попередньої історії спостережень

планети у 1966 і 1995 рр. поглинання у північній літній півкулі було помітно більшим, ніж у південній. До цього саме північна півкуля була відкрита Сонцю.

Протилежний ефект спостерігався в 1980 р., коли поглинання було більшим вже у південній літній півкулі Сатурна [44]. Перед цим саме вона безперешкодно освітлювалася Сонцем. Останнє рівнодення на Сатурні було у 2009 р. На відміну від вираженої асиметрії поглинання у південній і північній півкулях у 1966, 1980 і 1995—1996 рр. [27, 31], у рівнодення 2009 р. різниці у поглинанні між півкулями на середніх широтах майже немає. До цього моменту Сатурн був нахилений до Сонця південною літньою півкулею, і там спостерігалось зростання метанового поглинання [29, 30].

Отже, значення яскравості у метанових смугах поглинання усіх досліджуваних широтних поясів, отриманих у 1995 р., перебували у протифазі до аналогічних даних, отриманих у 1980 р. [3, 19—21, 26], та у фазі — із отриманими у 1966 р. спостереженнями при однакових умовах попередньої історії до цих моментів [32]; загальний хід зміни поглинання у ці роки був схожим, хоча саме поглинання метаном за попередні 10—12 років перед рівноденнями, у як у 1966 р., так і у 1995 р. у північній літній півкулі, яка сильніше опромінювалася Сонцем, було більшим, ніж у південній.

Ми передбачали, що у рівнодення 2009 р. широтний розподіл поглинання метаном виявиться протилежним до того, що спостерігався у 1995 р., та схожим на розподіл у 1980 р. Однак цього не сталося: у північній зимовій півкулі поглинання не зменшилося, тоді як у літній південній — помітно збільшилося.

**Відмінності метанового поглинання у 2009—2010 рр.** Хоча усі орбітальні характеристики Сатурна у рівнодення 1966 та 1980 рр., а також 1995 і 2009 рр. практично повторилися, проте відгук на них був абсолютно різним [10, 18, 21, 52]. Зокрема, у три попередні рівнодення максимальне метанове поглинання реєструвалось на тій півкулі Сатурна, помірні широти якої приблизно 14 років безперешкодно освітлювалися сонячним світлом; у протилежній півкулі, на помірних широтах якої 14 років була зима і котрі закривалися кільцями, метанове поглинання завжди було мінімальним. Однак, коли у 2007 р. вдалося спостерігати, окрім південних літніх областей, ще й приполярні північні зимові області на широтах 45...75°, які тільки-но вийшли з-під кілець, то несподівано виявилось, що поглинання у південних та північних широтах практично однакове [27]. Такий же висновок підтвердили й пізніші спостереження у 2008—2012 рр. [31]. Тобто, у рівнодення 2009 р., на відміну від інших рівнодень, спостерігалася симетричне (однакове) поглинання у півкулях. При цьому поглинання у південній літній півкулі, як і очікувалося, істотно збільшилося, але у північній зимовій півкулі очікуваного зменшення поглинання після виходу з-під кілець не відбулося. Тобто, на півночі хмари залишилися глибоко.



Можна вважати, що після рівнодення в 1966 і 1995 рр. відбувалося поступове випаровування частинок і зниження об'ємної густини аміачних хмар у літній південній півкулі, а після 1980 р. — у літній північній півкулі [32]. Це, у свою чергу, призводило до поступового посилення там метанового поглинання. А ось очікуваного утворення високого аміачного туману після виходу атмосферних шарів з-під кілець на пряме опромінення Сонцем — не відбулося.

Газоподібний аміак не зміг перетворитися на кристали льоду — з невідомих причин фазовий перехід «газ — лід» для аміаку не відбувся. Аміачні хмари залишилися на глибоких рівнях в атмосфері, а газоподібний аміак на рівні тропопаузи залишився «теплим» і не зміг кристалізуватися.

Зображення Сатурна з космічного апарата «Кассіні» [10] в цей час показали помітне ослаблення конвективних процесів [45] в атмосфері планети. Це могло вплинути на об'ємну густину хмарного шару і, швидше за все, хмари залишилися внизу, а туман над хмарами при цьому трохи збільшився. У сукупності це посилює смуги поглинання, які утворюються у процесі багаторазового розсіювання [30].

В роботі [45] ми представили результати визначення оптичних параметрів газової й аерозольної атмосферних складових по розподілах яскравостей на диску Сатурна у неперервній частині спектру та у смугах молекулярного поглинання [6, 12, 17, 52] для моментів, близьких до рівнодень у 1966, 1980, 1995 та 2009 рр. на основі наявних фотометричних і поляриметричних спектральних даних.

Процедура обчислень детально описана в роботах [10, 49]. Обчислення провадилися на основі припущення, що відбите випромінювання у діапазоні спектру  $\lambda = 300 \dots 800$  нм сформувалося в частині атмосфери Сатурна, яку можна представити парою однорідних шарів: верхній є оптично тонким та чисто газовим, а нижній — газозольним півнескінченим шаром. Передбачалося, що аерозольні частинки складаються з аміаку, який не поглинає світла у видимій області спектру, та незначної кількості невідомої домішки. Дійсна частина показника заломлення таких частинок  $n_r = 1.35$  і  $n_i = 1.42$ . Розподіл частинок по розмірах вважався нормально-логіфімічним з середнім радіусом  $r = 1.0$  мкм і дисперсією розмірів 0.12.

Вважалося, що атмосфера є воднево-гелієвою (85 % водню і 15 % гелію) [41]. Для  $\lambda = 316$  і  $725$  нм оцінювалися такі параметри [45]: значення  $\mu_c$ ,  $\mu_c(\lambda)$ ,  $\mu_c^R$ , об'ємний коефіцієнт розсіювання середовища  $\mu_c$ , об'ємна концентрація аерозолів  $n$ ,  $R$  і спектральні коефіцієнти яскравості  $r_c(\lambda)$  для центрів поясів на широтах близько  $9^\circ$  та визначалися значення  $\mu_0$  і  $\mu_0$  (таблиця).

Ми отримали, що спектральні значення оптичної товщини чисто газового шару над хмарами узгоджуються із розрахунками за умови, що дана атмосфера є або чисто газовою, або ж містить дрібні аерозолі з розміром, набагато меншим від 0.1 мкм. А фотометричні відмінності між широтними поясами Сатурна на різних довжинах хвиль можуть

## Значення деяких параметрів двошарової моделі атмосфери для чотирьох моментів рівнодення [47]

	$R_0/R_0(1)$	$R_0(1)$	$r_0(1)$	$\rho_0$	$10^{-4}$	$10^{-6} \text{ см}^{-1}$	$n_s, \text{ см}^{-1}$	$c$	$n_i, 10^{-4}$
1966 г.									
+10	1.021±0.006	0.327	0.810	0.159 ±0.015	34 ±19	2.3	18	0.9965	1.68
-09	1.009±0.005	0.312	0.776	0.174 ±0.017	42 ±21	2.0	15	0.9948	2.07
1980 г.									
+10	1.008±0.005	0.310	0.764	0.167 ±0.006	41 ±13	1.8	14	0.9946	2.26
-08	1.031±0.003	0.333	0.840	0.148 ±0.003	31 ±10	2.5	19	0.9966	1.51
1995 г.									
+9	1.020±0.01	0.330	0.800	0.150±0.020	34 ±20	2.4	19	0.9965	1.68
-9	1.010±0.01	0.310	0.760	0.170±0.020	43 ±20	1.9	15	0.995	2.10
2009 г.									
+9	1.010±0.01	0.320	0.830	0.150±0.010	41 ±13	2.3	18	0.996	1.72
-9	1.010±0.01	0.330	0.830	0.150±0.010	39 ±10	2.4	19	0.9966	1.70

бути викликані відмінностями в об'ємній концентрації аерозолів, оптичній товщині чисто газового шару вище хмар, співвідношенням між концентраціями аерозолів і газу, та значеннями уявної частини показнику заломлення частинок у хмарах  $n_i$  ( ). Зміни цих параметрів дуже слабо позначаються на поляризаційних характеристиках атмосфери, але істотно впливають на її яскравість.

Як впливає із отриманих у 2009 р. даних, у південній півкулі, яка перед цим до 14 років освітлювалася Сонцем, на широтах  $-9^\circ$  з півних причин більше поглинальних домішок: 17000 — проти 15100 у 1980 р. Натомість у закритій кільцями екваторіальній зоні у 2009 р. кількість домішок чомусь не збільшилася, як це відбувалося у всі попередні три сезони рівнодень після виходу екваторіальних областей з-під кілець; там домішок було зазвичай на 15...20 % більше, ніж в інших регіонах. Також у цих частинах атмосфери, як правило, на 20 % зменшувався об'ємний коефіцієнт розсіювання середовища ( ). Але у 2009 р. цього не відбулося. Крім того, оптичні товщини газових шарів над хмарами в обох екваторіальних областях — і в тій, яка перебувала на Сонці, і в тій, що закривалася кільцями — є однаковими, як однаковими є й глибини метанових смуг поглинання.

**Висновки щодо причини змін.** З аналізу розрахованих значень параметрів для різних широт підтверджено висновок про те, що для півкулі, яка до моменту отримання спостережних даних екранувалася кільцями (тобто, де тривалий час була зима: до 1966 р. і до 1995 р. у південній півкулі, і до 1980 р. — у північній півкулі) хмарний шар є розрідженішим та його верхня межа розташовується вище, ніж у півкулі, котра раніше «пережила» сезон літа. Натомість екваторіальні області, які протягом тривалого часу перебували у тіні кілець, відчуваю-

чи дефіцит припливу в атмосферу сонячної радіації, відрізнялися від інших широтних поясів дещо підвищеною кількістю поглинальної домішки.

Однак 2009 рік не повторив такі почергові зміни (див. табл. 1). Адже північна екваторіальна область, яка щойно була вийшла з тіні кілець, не показала зменшення метанового поглинання. Тобто, у цій частині атмосфери не утворилися ні висотний туман, ані розріджений хмаровий шар. Оскільки ці новоутворення мають фотохімічну природу, то можна припустити, що з якоїсь причини не вистачило енергії в атмосфері для утворення фотохімічних аерозольних шарів, який зазвичай утворювався в стратосфері Сатурна і не дозволяв глибоко «заглядати» у тропосферні хмари, зменшуючи метанове поглинання і підвищуючи їхнє альbedo.

Нагадаємо, що саме цей рік вирізняється тим, що, на відміну від попередніх трьох рівнодень, мав місце мінімум сонячної активності [44, 46].

Вимірювання середньої зональної температури, засновані на теплових спостереженнях з інфрачервоними спектрометрами на КА «Вояджер» у 1980—1981 рр. (рис. 3а) і «Кассіні» в 2009—2010 рр. (рис. 3б), дозволили вивчати вертикальну структуру на рівнях тиску 50...750 мбар [16].

Місія «Кассіні» спостерігала за системою Сатурна з 2004 по 2017 рр. (з початку зими до літнього сонцестояння), охоплюючи половину року планети [11]. Отримані дані показали тропічне потепління на 8...10 К (при точності до 1 К) у південних і на 5...6 К у північних екваторіальних широтах, яке відбулося від епохи апаратів «Вояджер» до епохи «Кассіні» на рівнях тропопаузи з тиском 50...70 мбар за один сатурніанський рік (рис. 3в). За спостереженнями «Кассіні» зональні вітри на цьому рівні зросли до 90 м/с (порівняно із 80 м/с за даними КА «Вояджер» на цих же широтах). Максимальна зміна температури на 10 К є більшою, ніж сезонна зміна на декілька кельвінів на однакових широтах. Це означає, що окрім сезонних змін на планеті відбуваються ще й сильні часові зміни. Але сезонні коливання раніше вдалося знайти у середній та високій стратосфері. Видимим хмарам відповідає рівень тиску 360 мбар. На цьому рівні потепління від епохи КА «Вояджер» до епохи «Кассіні» становить 2 К на широтах  $+10^\circ$  і 4 К на широті  $-10^\circ$ . Вище і нижче рівня хмар — при тисках 150 та 750 мбар — навколо екватора спостерігається охолодження на 2 К. Причому, як показали спеціальні дослідження, таке охолодження освітлених регіонів є радіаційним [22]. Хоча й динамічні зміни в цьому регіоні також не можуть бути виключені повністю. Такі значні часові зміни температури атмосфери протягом одного року на Сатурні є зовсім новим фактом [16].

Із рис. 3 також випливає, що при спостереженнях із КА «Вояджер» у 1980 р. температура тропопаузи (при  $P = 360$  мбар) на широті  $+12^\circ$  у зимовій півкулі становила 85 К, а у літній півкулі на широті  $-12^\circ$  — бу-



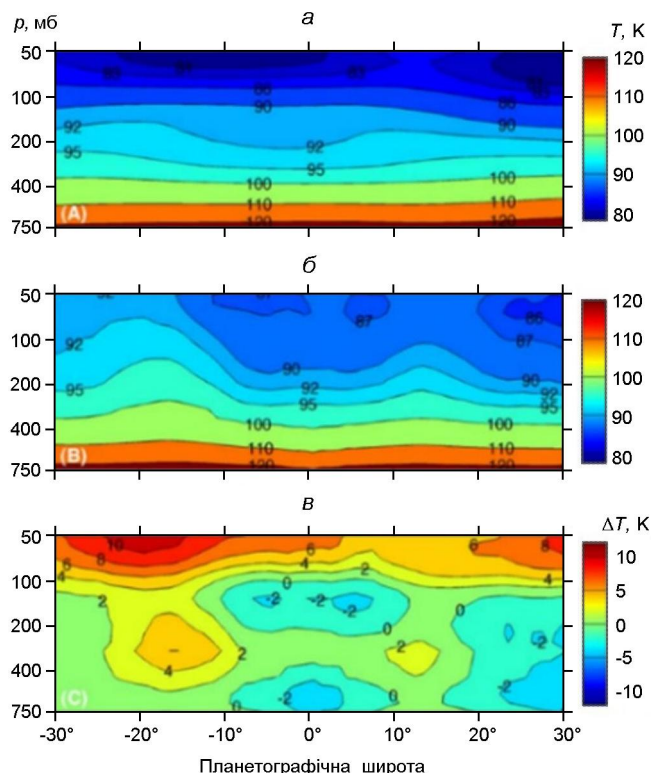


Рис. 3. Значення температури  $T$  Сатурна:  $a$  — за даними КА «Вояджер»,  $b$  — за даними КА «Кассіні»,  $c$  — їхня різниця  $\Delta T$  [16]

ло холодніше на 5 К; вирівнялися температури лише на рівні хмар при  $P = 360$  мбар. У 2010 р. на цих же широтах температура вже літньої південної півкулі була на 5 К теплішою від зимової північної, і вирівнялися температури в обох півкулях лише при значеннях тиску  $P = 700$  мбар.

Тобто, комбіновані спостереження КА «Вояджер» і «Кассіні» показали, що тропічна атмосфера навколо тропопаузи нагрілась на більш ніж 10 К від одного сатурніанського року (1980) до наступного (2010), і це дає картину часових варіацій теплових полів на Сатурні. Враховуючи такі відмінності температури у приекваторіальних широтах та факт, що у 2010 р. індекс  $R$  сонячної активності був близьким до нуля, а у 1980 р. він перевищував значення 150 [38], то порівнюючи спектрофотометричні спостережні дані в останні чотири епохи рівнодень та зіставляючи їх зі значеннями індексу сонячної активності, ми оцінюємо, що радіаційна стала воднево-гелієвої атмосфери Сатурна на рівнях верхньої тропосфери має становити близько 4-5 земних років.

Представлені у роботах [2, 4, 15] розрахунки у рамках запропонованої глобальної моделі клімату для Сатурна (названої Saturn DYNAMICO GCM [23]), у якій поєднано пристосовану для цієї плане-

ти радіаційно-сезонну модель до гідродинамічних розв'язків відповідних рівнянь, підтверджують можливість того, що подібне значне потепління у тропопаузі може досить швидко змінити атмосферну стратифікацію та її стабільність на рівнях навколо тропопаузи. Саме тут спектрометрами «Кассіні» було ретельно досліджено такі продукти фотохімічних реакцій у стратосфері Сатурна, як ацетилен ( $C_2H_2$ ) та етан ( $C_2H_6$ ). Ці обидва вуглеводні мають досить важливе значення для теплового балансу стратосфери планети [9], оскільки їхні варіації практично віддзеркалюють вертикальні переміщення у цій частині атмосфери. Після весняного рівнодення у 2009—2010 рр. північна та південна півкулі Сатурна почали входити, відповідно, у сезони весни та осені. Дослідження змін термічної структури та концентрації етану й ацетилену по мірі зміни сезонів на Сатурні [22] показали їхній суттєвий вплив на крупномасштабну динаміку верхньої атмосфери планети у 2010 р. [11].

1. Baines K. H., Drossart P., Momary T. W., et al. (2005) The atmospheres of Saturn and Titan in the near-infrared first results of Cassini/VIMS. *Earth, Moon, and Planets*. 96(3-4). 119—147.
2. Bardet D., Spiga A., Guerlet S., et al. (2021) Global climate modeling of Saturn's atmosphere. Part IV: Stratospheric equatorial oscillation. *Icarus*. 354, id. 114042.
3. Bezaud B., Gautier D., Conrath B. (1984) A seasonal model of the Saturnian upper troposphere Comparison with Voyager infrared measurements. *Icarus*. 60, Nov. 274—288.
4. Cabanes S., Spiga A., Young R. M. B. (2020) Global climate modeling of Saturn's atmosphere. Part III: Global statistical picture of zonostrophic turbulence in high-resolution 3D-turbulent simulations. *Icarus*. 345, id. 113705.
5. Cess R. D., Cochran J. (1979) A Saturnian stratospheric seasonal climate model. *Icarus*. 38. 349—357.
6. Cochran A. L., Cochran W. D. (1981) Longitudinal variability of methane and ammonia bands on Saturn. *Icarus*. 48, Dec. 488—495.
7. Conrath B. J., Pirraglia J. A. (1983) Thermal structure of Saturn from Voyager infrared measurements — Implications for atmospheric dynamics. *Icarus*. 53, Feb. 286—292.
8. 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.
9. Edgington S., Atreya S. Wilson., et al. (2019) Photochemistry and Heating in Saturn's Atmosphere: Ring Shadow and Ring Reflection. *EPSC-DPS Joint Meeting 2019*, 15—20 September 2019, Geneva, Switzerland, id. EPSC-DPS2019-954.
10. Fletcher L. N., Achterberg R. K., Greathouse Th. K., et al. (2010) Seasonal change on Saturn from Cassini/CIRS observations 2004—2009. *Icarus*. 208(1). 337—352.
11. Hueso R., Sónchez-Lavega A., Rojas J. F. et al. (2020) Saturn atmospheric dynamics one year after Cassini: Long-lived features and time variations in the drift of the Hexagon. *Icarus*. 336, id. 113429.
12. Karkoshka E., Tomasko M. G. (1992) Saturn's upper troposphere 1986—1989. *Icarus*. 97(2). 161—181.

13. Karkoschka E., Tomasko M. (2005) Saturn's vertical and latitudinal cloud structure 1991—2004 from HST imaging in 30 filters. *Icarus*. 179(1). 195—221.
14. 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). 354—357.
15. Leigh N. F. (2017) Saturn's seasonal atmosphere. *Astron. and Geophys.* 58(4). 4.26—4.30.
16. Liming L., Richard K. A., Barney J. C., et al. (2013) Strong temporal variation over one saturnian year: From Voyager to Cassini. *Sci. Reps.* 3. 1—5.
17. Marin M. (1968) Photometric photographique de Saturne. *J. Observ.* 51(3). 179—191.
18. Perez-Hoyos S., Sanchez-Lavega A., French R. G., Rojas J. F. (2005) Saturn's cloud structure and temporal evolution from ten years of Hubble Space Telescope images (1994—2003). *Icarus*. 176. 155—174.
19. Price M. J., Franz O. G. (1980) Saturn: UBV photoelectric pinhole scans of the disk. II. *Icarus*. 44(4). 657—667.
20. Sanchez-Lavega A., Lecacheux J., Colas F., Laques P. (1993) Temporal behavior of cloud morphologies and motions in Saturn's atmosphere. *J. Geophys. Res.* 98(E10). 18,857—18,872.
21. Sanchez-Lavega A., Quesada J. A. (1988) A survey of Saturn's northern hemisphere from 1979 to 1987. *Planet. Space Sci.* 36(12). 1381—1389.
22. Sinclair J. A., Irwin P. G. J., Fletcher L. N., et al. (2012) Seasonal variations of temperature, acetylene and ethane in Saturn's atmosphere from 2005 to 2010, as observed by Cassini-CIRS. *Icarus*. 225(1). 257—271.
23. Spiga A., Guerlet S., Millour E., et al. (2020) Global climate modeling of Saturn's atmosphere. Part II: Multi-annual high-resolution dynamical simulations. *Icarus*. 335, id. 113377.
24. Steklov A. F., Vidmachenko A. P., Minyailo N. F. (1983) Seasonal variations in the atmosphere of Saturn. *Soviet Astron. Lett.* 9(2). 135—136.
25. Teifel V. G. (1975) Calculation of the depths of absorption lines and bands on the disk of a planet surrounded by a semi-infinite homogeneous atmosphere. *Solar System Res.* 9. P. 57.
26. Teifel V. G. (1980) Optical properties and structure of Saturn's atmosphere. *Solar Syst. Res.* 14(1). 1—16.
27. Teifel V. G., Karimov A. M., Kharitonova G. A. (2010) Comparison of the latitudinal variations of the methane absorption. *Astron. Tsirkulyar.* 1573. 1—2.
28. Teifel V. G., Usol'tseva L. A., Kharitonova G. A. (1973) Optical properties and structure of Saturn's atmosphere. II. Latitudinal variations of absorption in the 0.62- $\mu$  CH<sub>4</sub> band and characteristics of the planet in the near ultraviolet. *Sov. Astron.* 17. 108—111.
29. Teifel V. G., Vdovichenko V. D., Karimov A. M., et al. (2008) The space-time variations of the molecular absorption bands on Jupiter and Saturn from 1995—2007 observations. *39th Lunar and Planetary Science Conference, March 10—14, 2008*, League City, Texas. LPI Contribution No. 1391. 1530.
30. Teifel V. G., Vdovichenko V. D., Karimov A. M., et al. (2010) Saturn at and between the equinoxes 1995 and 2009. *41st Lunar and Planetary Science Conference, March 1—5, 2010*, Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1533. 1250.
31. Teifel V., Vdovichenko V., Karimov A., et al. (2010) Saturn CCD-spectrophotometry in 2009 and 2010 — a comparison of near- and post-equinox latitudinal distribution of molecular absorption. *European Planetary Science Congress 2010*, held 20—24 Sept. Rome, Italy. EPSC. 5. 322.

32. Temma T., Chanover N. J., Simon-Miller A. A., et al. (2005) Vertical structure modeling of Saturn's equatorial region using high spectral resolution imaging. *Icarus*. 175(2). 464–489.
33. Tomasko M. G., West R. A., Orton G. S., Teifel V. G. (1984) Clouds and aerosols in Saturn's atmosphere. *Saturn*. Tucson, AZ, University of Arizona Press. 150–194.
34. Trafton L. (1977) Saturn: Long-term variation of H<sub>2</sub>, and CH<sub>4</sub>, absorptions. *Icarus*. 31. 369–384.
35. Trafton L. (1985) Long-term changes in Saturn's troposphere. *Icarus*. 63. 374–405.
36. Vidmachenko A. P. (1985) Reflectivity of Saturn's South Equatorial Region from 1977 through 1981. *Solar System Res.* 18(3). 123–128.
37. Vidmachenko A. P. (1985) Activity of processes in the atmosphere of Jupiter. *Kinematics Phys. Celestial Bodies*. 1(5). 101–102.
38. Vidmachenko A. P. (1985) Possible effect of the rings on the photometric properties of Saturn's cloud layer. *Kinematics Phys. Celest. Bodies*. 1, Nov.-Dec. 12–15.
39. Vid'machenko A. P. (1987) Manifestation of seasonal variations in the atmosphere of Saturn. *Kinematics Phys. Celestial Bodies*. 3(6). 9–12.
40. Vidmachenko A. P. (1991) Giant planets — Theoretical and observational aspects. *Astron. Vestnik*. 25, May-June. P. 277–292.
41. Vid'machenko A. P. (1997) Temporal changes in methane absorption in Jupiter's atmosphere. *Kinematics Phys. Celestial Bodies*. 13(6). 21–25.
42. Vid'machenko A. P. (1999) Variations in Reflective Characteristics of Jupiter's Atmosphere. *Solar System Res.* 33(6). 464–469.
43. Vidmachenko A. P. (1999) Seasonal variations in the optical characteristics of Saturn's atmosphere. *Kinematics Phys. Celestial Bodies*. 15(5). 320–331.
44. Vidmachenko A. P. (2015) Influence of solar activity on seasonal variations of methane absorption in the atmosphere of Saturn. *Kinematics Phys. Celestial Bodies*. 31(3). 131–140.
45. Vidmachenko A. P. (2015) Seasons on Saturn. I. Changes in reflecting characteristics of the atmosphere at 1964–2012. *Astronomical School's Report*. 11(1). 1–14.
46. Vidmachenko A. P. (2015) Seasons on Saturn. II. Influence of solar activity on variation of methane absorption. *Astronomical School's Report*. 11(1). 15–23.
47. Vidmachenko A. P. (2016) Seasonal changes on Jupiter: 1. Factor of activity of the hemispheres. *Kinematics Phys. Celestial Bodies*. 32(4). 189–195.
48. Vidmachenko A. P. (2016) Seasonal changes on Jupiter: 2. Influence of the planet exposure to the Sun. *Kinematics Phys. Celestial Bodies*. 32(6). 283–293.
49. Vidmachenko A. P., Dlugach Zh. M., Morozhenko A. V. (1984) Nature of the optical nonuniformity in Saturn's disk. *Solar System Res.* 17(4). 164–171.
50. 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). 354–357.
51. Vidmachenko A. P., Steklov A. F., Minyajlo N. F. (1984) Seasonal activity on Jupiter. *Soviet Astron. Let.* 10(5). 289–290.
52. West R. A., Tomasko M. G., Smith B. A., et al. (1982) Spatially resolved methane band photometry of Saturn. I — Absolute reflectivity and center-to-limb variations in the 6190-, 7250-, and 8900-Å bands. *Icarus*. 51, July. 51–64.

*А. П. Видьмаченко*

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины,  
Киев, Украина

## ОСОБЕННОСТИ РАВНОДЕНСТВИЯ САТУРНА В 2010 ГОДУ

Экватор Сатурна наклонен к плоскости орбиты на угол  $26.75^\circ$  при периоде обращения вокруг Солнца 29.45 лет. Из-за эксцентриситета орбиты  $e = 0.056$  его южное полушарие получает на 25 % больше энергии от Солнца, чем северное, так как перигелий орбиты — Сатурн проходит в эпоху лета в южном полушарии, афелий — при лете в северном. Это сказывается на физических характеристиках и вертикальной структуре атмосферы. Мы зарегистрировали изменения на Сатурне и связали их с сезонным поступлением солнечной энергии. Для анализа мы использовали результаты наблюдений в моменты равноденствий 1966, 1980, 1995 и 2010 гг. Широкие различия метанового поглощения по диску показали существенную асимметрию между северным и южным полушариями. Причем, изменение поглощения в противоположных полушариях происходит по-разному. В идентичных условиях предыдущей истории планеты в 1966 и 1995 гг. — поглощение в северном летнем полушарии было больше, чем в южном. Противоположный эффект наблюдался в 1980 г., когда поглощение было большим в южном летнем полушарии. Последнее равноденствие на Сатурне было в 2009 г. Мы предполагали, что оно будет похожим на результаты 1980 г. Однако в отличие от выраженной асимметрии поглощения в полушариях в 1966, 1980 и 1995 гг. — в равноденствие 2009 г. различие поглощения между полушариями — почти отсутствует. Причем, в северном зимнем полушарии поглощение не уменьшилось, а в летнем южном — заметно увеличилось. Само же равноденствие 2009 г. отличалось тем, что, в отличие от предыдущих трех равноденствий, имел место минимум солнечной активности. Комбинированные наблюдения КА «Вояджер» в 1980 г. и «Кассини» в 2010 г. показали, что за один сатурнианский год — тропическая атмосфера в тропопаузе нагрелась на 10 К. Учитывая эти различия и то, что в 2010 г. индекс солнечной активности равнялся  $R = 0$ , а в 1980 г. — более 150, мы оцениваем, что радиационная константа водородно-гелиевой атмосферы Сатурна равна около 4.5 земных лет. А потепление в тропопаузе изменило атмосферную стратификацию и стабильность, и повлияло на крупномасштабную динамику верхней тропосферы в 2010 г.

**Ключевые слова:** Сатурн, атмосфера, сезонные изменения, метановое поглощение, равноденствие.

*A. P. Vidmachenko*

Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Kyiv, Ukraine

## FEATURES OF THE EQUINOX OF SATURN IN 2010

The equator of Saturn is inclined to the orbital plane at an angle of  $26.75^\circ$  with a period of revolution around the Sun of 29.45 years. Due to the eccentricity of the  $e = 0.056$  orbit, its southern hemisphere receives 25 % more energy from the Sun than the northern one, since the perihelion of orbit — Saturn passes during the summer epoch in the southern hemisphere, and aphelion — during summer in the northern hemisphere. This affects the physical characteristics and vertical structure of the atmosphere. We registered changes on Saturn and related them to the seasonal influx of solar energy. For the analysis, we used the results of observations at the equinox moments in 1966, 1980, 1995 and 2010. Latitudinal differences in methane absorption across the disk showed significant asymmetries between the northern and southern hemispheres. Moreover, the change in absorption in the opposite



hemispheres occurs in different ways. In identical conditions of the previous history of the planet in 1966 and 1995. — absorption in the northern summer hemisphere was greater than in the southern one. The opposite effect was observed in 1980 when absorption was large in the southern summer hemisphere. The last equinox on Saturn was in 2009. We assumed that it would be similar to the results of 1980. However, in contrast to the pronounced asymmetry of absorption in the hemispheres in 1966, 1980 and 1995. — in the equinox of 2009, the difference in absorption between the hemispheres is almost absent. Moreover, in the northern winter hemisphere, absorption did not decrease, but in the summer southern hemisphere it increased markedly. The very same equinox of 2009 differed in that, unlike the previous three equinoxes, there was a minimum of solar activity. Combined observations of Voyager in 1980 and Cassini in 2010 showed that in one Saturnian year — the tropical atmosphere in the tropopause warmed up by 10 K. Taking into account these differences and the fact that in 2010 the solar activity index  $R = 0$ , and in 1980 — more than 150, we estimate that the radiative constant of the hydrogen-helium atmosphere of Saturn is about 4.5 Earth years. And warming in the tropopause changed atmospheric stratification and stability, and influenced the large-scale dynamics of the upper troposphere in 2010.

**Keywords:** Saturn, atmosphere, seasonal changes, methane absorption, equinox.

Стаття надійшла до редакції 27.07.2020

Після доопрацювання 27.08.2020

Прийнята до друку 19.10.2020